

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 331, № 11, 2020

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Остальд 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)
Контарович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
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, 2020

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 331, № 11, 2020

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)
Belozarov V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretyak 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 SCOPE

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- | | | |
|--|--|---|
| <p>Кадастровые и геоэкологические характеристики особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий
Пасько О.А., Захарченко А.В.</p> <p>Экспериментальное исследование теплового газодинамического метода для предотвращения гидратообразования в газопроводах с использованием циклонов
Зятиков П.Н., Волков П.В., Большунов А.В.</p> <p>Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов
Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.</p> <p>Среднеквадратичные отклонения атомов – наномасштабный индикатор состояния поверхности
Заворин А.С., Любимова Л.Л., Буваков К.В., Фисенко Р.Н., Ташлыков А.А., Артамонцев А.И.</p> <p>Диагностический комплекс для эффективного контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов
Лавринович А.В., Мытников А.В.</p> <p>Формы нахождения германия и вольфрама в германий-угольном месторождении Спецугли (Дальний Восток)
Арбузов С.И., Ильенок С.С., Чекрыжов И.Ю.</p> <p>Определение деформаций стального вертикального цилиндрического резервуара объемом V=10000 м³ для нефти с применением наземного лазерного сканирования
Епифанова Е.А.</p> <p>Глубокие искусственные нейронные сети для прогноза значений дебитов добывающих скважин
Евсюткин И.В., Марков Н.Г.</p> <p>Современный золовый морфолитогенез: изученность, региональные проявления
Евсеева Н.С., Язиков Е.Г., Квасникова З.Н., Батманова А.С., Бучельников В.С.</p> <p>Алгоритм массовой кадастровой оценки лесных земель по таксационным показателям насаждений
Романчиков А.Ю., Ковязин В.Ф., Животыгина Н.И., Китченко А.А., Данг Тхи Лан Ань</p> <p>Применение линеamentного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в Южной Якутии
Строкова Л.А., Ежкова А.В., Леонова А.В.</p> <p>Изучение механизма перераспределения фильтрационных потоков при закачке синтезированных сшитых гелей методом рентгеновской томографии керна
Галкин С.В., Кетова Ю.А., Савицкий Я.В., Канг Ванли, Бауыржан Сарсенбекулы</p> <p>Геохимические и минералогические индикаторы ветровой дефляции на урбанизированных территориях с использованием листьев тополя
Дорохова Л.А., Юсупов Д.В., Рихванов Л.П.</p> <p>Оценка влияния термобарических условий на эффективность процесса низкотемпературной абсорбции при промышленной подготовке газа на месторождении крайнего севера
Кутуков В.В., Пономарев А.И., Чеботарев В.В.</p> <p>Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского (арктические районы Сибирской платформы)
Новиков Д.А., Максимова А.А., Пыряев А.Н., Ян П.А.</p> | <p>7</p> <p>20</p> <p>30</p> <p>37</p> <p>48</p> <p>60</p> <p>78</p> <p>88</p> <p>96</p> <p>108</p> <p>117</p> <p>127</p> <p>137</p> <p>147</p> <p>157</p> | <p>Cadastral and geoeological characteristics of especially valuable productive agricultural lands
Pasko O.A., Zakharchenko A.V.</p> <p>Experimental research of heat gas-dynamics method for preventing hydrate formation in gas pipelines using cyclones
Zyatikov P.N., Volkov P.V., Bolshunov A.V.</p> <p>Cementless backfill mixtures based on water-soluble manmade waste
Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.</p> <p>Root-mean-square deviations of atomic positions – nanoscale indicator of surface condition
Zavorin A.S., Lyubimova L.L., Buvakov K.V., Fisenko R.N., Tashlykov A.A., Artamontsev A.I.</p> <p>Diagnostics facility for effective control of winding condition of high voltage transformers
Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V.</p> <p>Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field (Russian Far East)
Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Chekryzhov I.Yu.</p> <p>Definition of deformations of steel vertical cylindrical reservoir with volume of V=10000 m³ for oil using terrestrial laser scanning
Epifanova E.A.</p> <p>Deep artificial neural networks for forecasting debit values for production wells
Evsyutkin I.V., Markov N.G.</p> <p>Present-day aeolian morpholithogenesis: state of knowledge and regional manifestations
Evseyeva N.S., Yazikov E.G., Kvasnikova Z.N., Batmanova A.S., Buchelnikov V.S.</p> <p>Algorithm of forestland mass cadastral evaluation using forest inventory data
Romanchikov A.Yu., Kovyazin V.F., Zhivotyagina N.I., Kitsenko A.A., Dang Lan Anh T.</p> <p>Application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in South Yakutia
Strokova L.A., Ezhkova A.V., Leonova A.V.</p> <p>X-ray analysis of conformance control technology based on preformed particle gel treatment
Galkin S.V., Ketova Yu.A., Savitskiy Ya.V., Kang Wanli, Bauyrzhan Sarsenbekuly</p> <p>Geochemical and mineral indicators of deflation in urban areas using poplar leaves
Dorokhova L.A., Yusupov D.V., Rikhvanov L.P.</p> <p>Evaluation of temperature and pressure conditions effect on low-temperature absorption effectiveness at gas treatment on the far north field
Kutukov V.V., Ponomarev A.I., Chebotarev V.V.</p> <p>First isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the south-east slope of the Chekanovsky ridge (Arctic areas of the Siberian platform)
Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Yan P.A.</p> |
|--|--|---|

- | | |
|--|--|
| <p>Особенности методологии выбора растворов первичного вскрытия продуктивных пластов на основе проведения фильтрационных экспериментов на керне
 Конесев В.Г., Четвертнева И.А., Тептерева Г.А.</p> <p>Гидродинамика при бурении импрегнированным породоразрушающим инструментом с эксцентриситетом режущей части торца матрицы
 Нескормных В.В., Петенев П.Г., Попова М.С., Комаровский И.А., Головченко А.Е., Баочанг Л.</p> <p>Оптимальная стратегия выбора подрядчика крупных капитальных нефтегазовых проектов
 Давыденков Е.В.</p> <p>Резервы повышения производительности подсистемы «карьерный транспорт – дробильный передел» с учетом коэффициентов использования дробильного оборудования
 Журавлев А.Г., Черепанов В.А.</p> <p>Mining and tourism: is it possible to sustain resource-driven region?
 Kiriyanova L.G.</p> | <p>168 Peculiarities of methodology for selecting solutions of primary opening of productive formations based on filtration experiments on core
 Konesev V.G., Chetvertneva I.A., Teptereva G.A.</p> <p>176 Hydrodynamics when drilling with an impregnated diamond tool with the eccentricity of the cutting part of the end face of the drilling tool matrix
 Neskormnykh V.V., Petenev P.G., Popova M.S., Komarovskiy I.A., Golovchenko A.E., Baochang L.</p> <p>186 Optimal strategy for selecting a contractor for major capital oil and gas projects
 Davydenkov E.V.</p> <p>195 Reserves to increase productivity of «quarry transport – crushing-and-concentrating plant» subsystem taking into account crushing equipment utilization factors
 Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A.</p> <p>208 Угольная промышленность и туризм: можно ли добиться устойчивого развития традиционной сырьевой территории?
 Кирьянова Л.Г.</p> |
|--|--|

УДК 629.78:630.52:587/588:528.88

КАДАСТРОВЫЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСОБО ЦЕННЫХ ПРОДУКТИВНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ

Пасько Ольга Анатольевна¹,
oap@tpu.ru

Захарченко Александр Викторович²,
avzakh@gmail.com

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

² Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

Актуальность связана с приоритетом охраны земель сельскохозяйственного назначения, среди которых важнейшее значение имеют особо ценные продуктивные сельскохозяйственные угодья. Особо ценные продуктивные сельскохозяйственные угодья – это статус земельных участков, призванный защитить их от перевода в другие категории земель, использовать рациональное хозяйствование. Свойства земель этого статуса рассматриваются в геоэкологических координатах.

Цель: изучение кадастровых и геоэкологических свойств особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий, их статистический анализ для дальнейшего мониторинга земель и охраны на примере Томской области.

Объекты: земельные участки особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий на территории Томской области.

Методы: аналитический, картографический, корреляционный и регрессионный виды анализа.

Результаты. Максимальное число участков особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий находится в Томском (559 шт.) и Кожевниковском (546 шт.) районах, наиболее развитых в с.-х. отношении. Наибольшее количество особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий высокой стоимости одного гектара сосредоточено вблизи Кривошеино–Молчаново и снижается к западу и югу. Максимальные средние значения стоимости особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий отмечены в Кривошеинском и Парабельском районах – 7470–8444 р./га. Площадь земельных ресурсов, пригодных для использования в сельском хозяйстве, в этих районах ограничена 69,2 тыс. га, что объясняет их более высокую стоимость. Минимальные значения стоимости особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий характерны для Каргасокского (1105 р./га), Бакчарского (1497 р./га) и Томского (1623 р./га) районов. Также выявлено влияние вида разрешенного использования на стоимость особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий и их размеры. Участки имеют сложную конфигурацию в 38 % случаях. Конфигурацию, близкую к правильной, имеют 22 % участков. Меньше всего участков особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий относится к неправильной форме – 9 %. Чем более правильная форма участка, тем выше его стоимость. Наибольшее число участков особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий (55 %) имеет значение коэффициента компактности в пределах 1,0–1,5; всего 5 % – коэффициент компактности, равный 1. Сравнительный анализ стоимости особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий, расположенных на плакоре, террасе и в пойме реки, выявил, что пойменные участки имеют меньшую стоимость по сравнению с плакорным и террасным положениями. Достоверные различия по стоимости гектара выявлены между угодьями «Луг» и «Пашня». Влияние вида угодий на площадь особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий достоверно высоко. Показано достоверное положительное влияние на площадь участков особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий наличие дороги. Расположение относительно населенного пункта также достоверно положительно влияет на площадь участков особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий, но не отражается на его стоимости. Отмечается положительный коэффициент корреляции спирмена между площадью и фрагментацией участка, что указывает на рост вероятности раздела участка с увеличением его площади. Географические координаты участка, выраженные в градусах, слабо отражаются на стоимости особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий. Заметна тенденция снижения стоимости и площади участков с увеличением широты в направлении с юга на север. Расстояние от участка до областного, регионального центров, крупных поселков не влияет на его стоимость.

Ключевые слова:

Особо ценные продуктивные сельскохозяйственные угодья, вид разрешенного использования, площадь, форма, статистический анализ.

Введение

Актуальность темы. Определение природно-экономического потенциала земельных ресурсов является завершающей стадией территориального землеустройства. Его спецификой являются: ограниченность в пространстве и многофункциональность, а также невозможность воспроизведения искусственным путем. Земельные ресурсы служат пространственным базисом для размещения хозяйственных объектов и расселения людей; средством и пред-

метом производства продуктов питания, кормов и сырья; основой продовольственной безопасности региона и страны [1–4]. Из земельных ресурсов приоритетными в использовании и охране являются земли сельскохозяйственного (с.-х.) назначения [5], что в России законодательно закреплено в статье 79 Земельного кодекса Российской Федерации [6]. Кроме того, в «Стратегии научно-технологического развития России до 2035 года» [7] и в «Доктрине продовольственной безопасности РФ» [8] указана необходи-

мость их рационального использования и восстановления, а также предотвращения сокращения площади земель с.-х. назначения для гарантии самообеспечения страны отечественной продукцией. Поэтому разработка системы землеустроительных мероприятий, направленных на сохранение этого природного ресурса территории, является актуальной проблемой современного научного землеустройства.

В приоритетной категории земель с.-х. назначения наиболее значимыми считаются, согласно ст. 79 Земельного кодекса РФ, особо ценные продуктивные с.-х. угодья (ОЦПСХУ). ОЦПСХУ – это статус земельных участков, призванный создавать условия для рационального хозяйствования, а также защищать от перевода в земли других категорий, в том числе несельскохозяйственного использования. Они выделены сравнительно недавно, поэтому свойства таких участков мало изучены, что осложняет анализ их структуры и оценку эколого-экономического состояния, проведение мониторинга земель. Изучение свойств земель с указанным статусом является основанием для принятия обоснованных управленческих решений, способствующих их защите от несельскохозяйственного использования, довольно широко распространенного в России.

Площадь земель с.-х. назначения в мире составляет 34 % от общей площади земель, из них в Китае – 13 %, США – 10 %, России – 5 %. Опыт выделения особо ценных сельскохозяйственных угодий присутствует в зарубежных странах. Механизм их определения и выделения в натуре зависит от формы собственности на землю [9]. При монополии государства на землю (КНР, Республика Беларусь) производится строгое регулирование защиты и охраны с.-х. земель, а также контроля их перевода в иные категории. Государство наделено правом свободного распоряжения землями и точно выполняет обязанности по их сохранению, ставя интересы общества выше интересов отдельных граждан.

Важным представляется опыт Китая, в котором из-за интенсивной урбанизации площадь земель с.-х. назначения сократилась на 15 % [10]. Их охрана как национального достояния была признана государственной задачей [11]. Особое внимание уделено улучшению пространственных характеристик сельскохозяйственных угодий, предотвращению их фрагментации и неэффективного использования. Бурное развитие получили методы математического моделирования, дистанционного зондирования Земли и зонирования земель с использованием ГИС [12]. С 2009 г. в Китае отмечается рост площади земель с.-х. назначения и повышение их плодородия [13, 14].

В США насчитывается около 373 млн га с.-х. земель, т. е. около половины от общей площади земельного фонда [9, 15]. В законе защиты с.-х. угодий (Farmland Protection Policy Act – FPPA) дана классификация земель, аналогичных ОЦПСХУ, в России [16]. В ней различают ведущие и уникальные с.-х. земли, а также с.-х. земли регионального (штата) и местного значения. Классификация земель в США позволяет выделять и сохранять особо ценные сельскохозяйственные угодья [17], поддерживать местное экономическое

разнообразие [18, 19] и устанавливать зеленые зоны [20].

В России вызывают вопросы принципы выделения ОЦПСХУ, которые в большинстве базируются на экономических подходах. Например, в статье 79 п. 4 Земельного кодекса РФ к ОЦПСХУ относят с.-х. угодья, кадастровая стоимость которых существенно превышает среднерайонный уровень [6]. С.-х. угодья, кадастровая стоимость которых превышает средний уровень по муниципальному району или городскому округу на пятьдесят и более процентов, могут быть включены в перечень земель, использование которых для других целей не допускается [21]. Следует подчеркнуть, что кадастровая стоимость сельскохозяйственных земель часто определяется субъективным подбором вида их использования по разновидностям почв [22], что может противоречить их природной ценности.

Согласно функциональному подходу, к ОЦПСХУ относят с.-х. угодья, расположенные в границах зон высокопродуктивных и продуктивных земель; используемые для научно-исследовательских, опытно-учебных целей, связанных с с.-х. производством; уникальные с.-х. земли, свойства которых соответствуют уникальным условиям выращивания отдельных видов с.-х. культур, многолетних насаждений и ягодников. Использование ОЦПСХУ для целей, не связанных с ведением сельского хозяйства, не допускается [23].

При проведении изыскательских работ для выделения ОЦПСХУ рекомендовано учитывать данные почвенных, геоботанических и землеустроительных исследований, баллы бонитировки земель и показатель зернового эквивалента [24], рабочих проектов по улучшению кормовых угодий, защиты земель от негативных явлений и т. д. [25, 26].

Правом формировать перечни ОЦПСХУ с использованием экономического и функционального подходов наделены субъекты РФ [27], однако на данный момент перечни частично составлены лишь в 46 субъектах РФ из 82 (без учёта городов федерального значения). К примеру, действующий перечень ОЦПСХУ Воронежской области содержит лишь 23 земельных участка площадью 12,9 тыс. га при общей площади с.-х. угодий в 4,2 млн га [28].

В Томской области Положения об ОЦПСХУ и список критериев отнесения к ним содержатся в ст. 4.1 закона «Об обороте земель с.-х. назначения в Томской области» [29]. Порядок формирования перечня ОЦПСХУ и непосредственно сам перечень установлены Департаментом по социально-экономическому развитию села Томской области [30, 31]. Земли, получившие данный статус, могут быть использованы только по своему назначению.

Актуальность изучения земель со статусом ОЦПСХУ вызвана тем, что за последние 30 лет в России произошло резкое сокращение площади земель с.-х. назначения (до 60 %) [32]. Из-за банкротства с.-х. предприятий земли перестают использоваться по назначению и зарастают лесом. За последние 20 лет из сельскохозяйственного оборота России выведены 2,3 млн земельных участков плодородных земель. Площадь ежегодного зарастания земель с.-х. назначения кустарником

и мелколесьем составляет 2,4 млн га. Так как переход с.-х. угодий в заброшенные земли вышел из-под контроля государства, среди них могут оказаться ОЦПСХУ.

Для преодоления негативных тенденций во многих регионах России определены условия охраны с.-х. угодий, которые должны обеспечить объективную оценку почв [33] и земель [34] и способствовать совершенствованию земельного законодательства [31].

Актуальность исследования обусловлена с одной стороны высокой ценностью ОЦПСХУ для будущих поколений людей, с другой – их формальным выделением и отсутствием методик по оценке агроэкологического состояния с учетом действующих нормативных документов землеустройства. Земли с этим статусом находятся под влиянием геоэкологических факторов, что должно найти свое отражение в площади, форме и стоимости участков. В этом случае требуется комплексная оценка земель с использованием междисциплинарного подхода для анализа.

Целью исследования является изучение кадастровых и геоэкологических показателей ОЦПСХУ, их статистический анализ для дальнейшего мониторинга земель и охраны на примере Томской области.

Практический смысл исследования определяется анализом сложившейся ситуации с выделением

ОЦПСХУ для коррекции методологии придания землям указанного статуса.

Материалы и методики исследования

Объектом исследования являются земли с.-х. назначения Томской области, расположенной в юго-восточной части Западно-Сибирской низменности, имеющие статус ОЦПСХУ (1627 участков). Речная система принадлежит бассейну реки Обь, которая пересекает территорию области с юго-востока на северо-запад и делит ее на две почти равные части. На долю речных долин приходится около 20 % всей территории области [35]. Общая площадь с.-х. земель Томской области равна 2 млн 18,9 тыс. га, что в структуре земель составляет около 6 %. С.-х. угодья сосредоточены в южной части области, они занимают площадь около 1 млн 242,6 тыс. га [36].

Для анализа состояния земель ОЦПСХУ выбран Томский кадастровый округ, включающий 23 кадастровых района с разным числом участков ОЦПСХУ (от 0 до 559 угодий). По каждому из них случайным отбором сформирована выборка в 10 участков; при отсутствии участков ОЦПСХУ районы исключены из анализа. При числе участков менее 10 в выборку включены все (рис. 1). Общее число участков для подробного анализа равно ста семи.

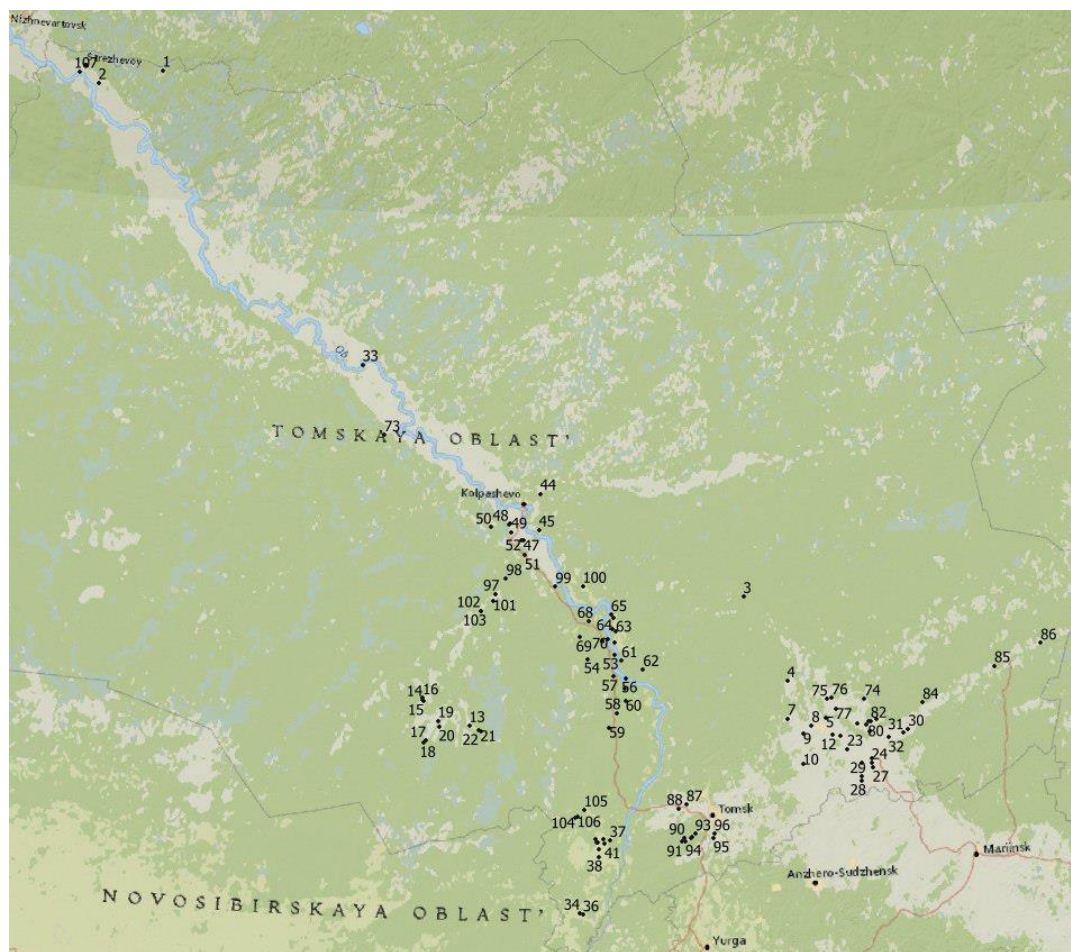


Рис. 1. Распределение участков наблюдения на карте Томской области (Tomskaya oblast) (цифрами дана нумерация точек наблюдения)

Fig. 1. Distribution of observation sites on a map of Tomsk oblast (numbers – numbering of sample data)

По данным публичной кадастровой карты определены следующие показатели земель [37]:

1. Кадастровый номер, географические координаты центра участка.
2. Факт наличия описания местоположения границ.
3. Площадь земельного участка.
4. Кадастровая стоимость земельного участка.
5. Категория земель.
6. Вид ОЦПСХУ.
7. Площадь.
8. Вид разрешённого использования (ВРИ) [37]. ВРИ ОЦПСХУ в Томской области ограничен следующими вариантами:
 - 8.1. Разработка полезных ископаемых.
 - 8.2. Сельхозпроизводство.
 - 8.3. Объекты с-х. и уголья.
 - 8.4. Развитие учебного хозяйства, личное подсобное хозяйство.
 - 8.5. Под пасеку.
 - 8.6. Фермерское хозяйство.
9. Функциональные характеристики земель:
 - 9.1. Пашня.
 - 9.2. Луг.
 - 9.3. Сенокос.
 - 9.4. Пастбища.
 - 9.5. Многолетние насаждения.

Виды ОЦПСХУ и ВРИ утверждены постановлением Администрации Томской области [26].

Для геоэкологического изучения и построения географических моделей использованы программы ArcGIS, QGIS (приложения ArcCatalog, ArcMap) и SAS Planet. Границы всех ОЦПСХУ векторизованы в полуавтоматическом режиме с помощью ArcGIS. Для уточнения площади с-х. уголья при наличии вкраплений других участков границы последних оцифрованы и вырезаны из общего контура. Для оценки правильности формы угодий рассчитан коэффициент компактности как частное от деления периметра контура на периметр квадрата той же площади [37]. С использованием ГИС-технологий определены расстояния каждого участка до областного, регионального центров и ближайших крупных населенных пунктов.

В качестве геоэкологических показателей ОЦПСХУ выбраны:

- число частей участка,
- коэффициент компактности,
- однородность внутренней структуры,
- тип почвы,
- наличие дороги,
- расположение относительно региональных центров.

Учтено положение ОЦПСХУ на местности (платкор, терраса или пойма). Склоновое положение отсутствует, поскольку в Томской области земли этой категории приурочены к выравненным возвышенным пространствам. Под платкором понимаются возвышенные водораздельные пространства, склоны небольшой экспозиции, высокие террасы речных долин, т. е. территории, на которые не может поступать осадочный материал с вышерасположенных участков.

Выполняются условия суглинистости состава пород, умеренной возвышенности и дренированности, равнинности рельефа.

В основу исследования положен статистический анализ мониторинговых параметров земельных ресурсов. Параметры «Площадные размеры» и «Стоимость участков» имеют показательное распределение случайных величин. Характер их распределения приводит к необходимости анализа не столько средних величин, сколько непараметрических статистических показателей – медиан и квантилей. При анализе данных значений площади и стоимости участков использованы непараметрические методы (критерии Краскела–Уоллиса (Kruskal–Wallis ANOVA), Манна–Уитни (Mann–Whitney U Test) и коэффициент корреляции Спирмена).

Результаты исследования и обсуждение

Максимальное число ОЦПСХУ находится в Томском (559 шт.) и Кожевниковском (546 шт.) районах, наиболее развитых в с-х. отношении (рис. 2). Для них характерны наиболее благоприятные почвенно-климатические условия и максимальная для Томской области концентрация населения.

Стоимость земельного участка является важнейшим условием придания ему статуса ОЦПСХУ. Максимальное количество ОЦПСХУ с высокой стоимостью одного гектара сосредоточено вблизи Кривошеино–Молчаново (рис. 3).

Максимальные средние значения стоимости ОЦПСХУ отмечены в Кривошеинском и Парабельском районах – 7470–8444 р./га (табл. 1). Отметим, что Кривошеинский район считается сугубо с-х. районом. Площадь земельных ресурсов, пригодных для использования в сельском хозяйстве, ограничена 69,2 тыс. га, что объясняет более высокую стоимость ОЦПСХУ.

Минимальные значения стоимости ОЦПСХУ характерны для Каргасокского (1105 р./га), Бакчарского (1497 р./га) и Томского (1623 р./га) районов. Медианные значения стоимости ОЦПСХУ более высоки, особенно в Томском районе (1890 р./га). В целом в Томской области преобладают ОЦПСХУ (55 %) с кадастровой стоимостью в пределах 20000 р./га, 27 % – 20001–40000 р./га, 13 % – 120001–140000 р./га, 4 % – 60001–80000 р./га и 2 % – 40001–60000 р./га. Наиболее распространены ОЦПСХУ с кадастровой стоимостью 18900 р./га, что лишь на 500 р. превышает среднюю кадастровую стоимость земель с-х. назначения в Томской области.

Возникает вопрос: какие факторы влияют на мониторинговые характеристики земельных участков? Выявлено, что площади и стоимости земельных участков изменяются в зависимости от вида их разрешенного использования (ВРИ) (табл. 2).

Установлено, что наибольшую площадь имеют объекты с ВРИ под «Иные виды использования» (4603 га), но их медианное значение существенно ниже среднего (826 га). Аналогичная ситуация с таким ВРИ, как сельхозпроизводство, в котором также задействованы большие площади земель (среднее значение – 4402 га, медианное – 472,5 га). Меньшими

площадями характеризуются объекты сельского хозяйства и угодья (среднее значения 2569 га, с медианное – 1819 га). Минимальные средние значения пло-

щади имеют ОЦПСХУ с видами использования: «Личное подсобное хозяйство» (127 га), «Фермерское хозяйство» (110 га) и «Под пасеку» (6 га).

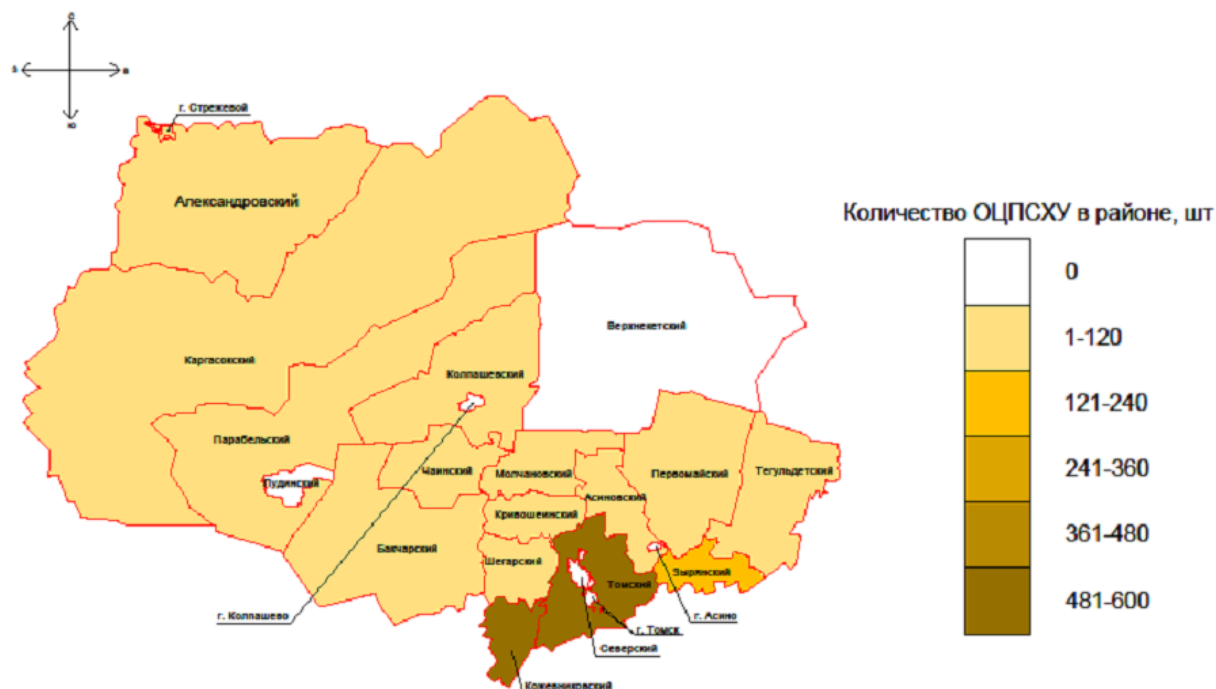


Рис. 2. Представленность ОЦПСХУ в Томском кадастровом округе

Fig. 2. Representation of particularly valuable productive agricultural land in the Tomsk cadastral district

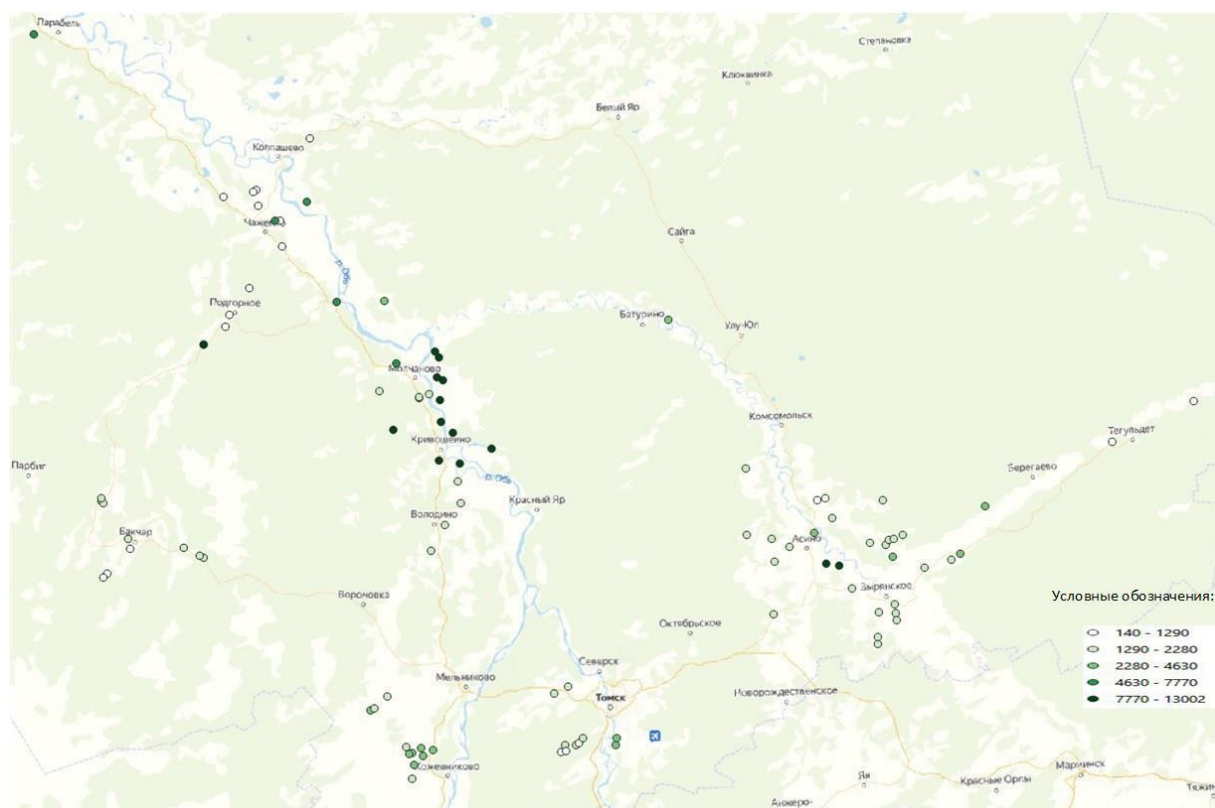


Рис. 3. Распределение по территории области стоимости (р./га) изученных участков

Fig. 3. Distribution of the cost (rubles/ha) of the studied sites over the territory of the region

Таблица 1. Средняя стоимость ОЦПСХУ и законодательно рекомендованная минимальная стоимость земельных участков по районам Томской области

Table 1. Average cost of particularly valuable productive agricultural land and the legally recommended minimum cost of land in the districts of the Tomsk region

Район Area	Число объектов, шт. Number of objects, PCs.		Стоимость, р./га Cost, RUB/ha	
	Выборочных Sample	Всего Total	Средняя Average	Законодательно рекомендованная Legally recommended
Александровский*/Alexandrovo*	3	3	1033	2200
Асиновский/Asino	10	46	4308	15300
Бакcharский/Bakchar	10	20	1497	11200
Зырянский/Zyryanskoe	9	180	2063	17900
Каргасокский/Kargasok	1	1	1105	1600
Кожевниковский/Kozhevnikovo	10	546	2469	20800
Колпашевский/Kolpashevo	10	18	2206	4500
Кривошеинский/Krivosheino	10	19	8444	13600
Молчановский/Molchanovo	10	35	8037	12100
Парабельский/Parabel	1	1	7470	3500
Первомайский/Pervomayskoe	10	45	1810	10900
Тегульдский/Teguldet	3	8	2007	4300
Томский/Tomsk	10	559	1623	13500
Чаинский/Chaya	7	78	3839	9000
Шегарский/Shegarka	3	64	2273	18400

* ОЦПСХУ г. Стрежевой включены в состав объектов Александровского района.

*Particularly valuable productive agricultural land in Strezhevoy are included in the facilities of the Aleksandrovsky district.

Таблица 2. Вид разрешенного использования, площадь и стоимость ОЦПСХУ в Томской области

Table 2. Type of permitted use, area and cost of particularly valuable productive agricultural land in the Tomsk region

Вид разрешённого использования Type of permitted use	Число, шт. Number, PC	Площадь, га Area, ha		Стоимость, р./га Cost, rub/ha	
		Средняя Average	Медиана Median	Средняя Average	Медиана Median
Разработка полезных ископаемых* Mineral development*	1	0,01	–	2280,00	–
Сельхозпроизводство Agricultural production	38	4402	472,5	1121,89	1865
Объекты с.х. и угодья Agricultural objects and land	37	2569	1819,0	1992,75	1890
Развитие учебного хозяйства* Educational development*	3	920	–	1367,10	–
Личное подсобное хозяйство Private farm	11	127	3,3	1902,74	2030
Под пасеку/For apiary	6	6	3,7	8416,87	1360
Фермерское хозяйство*/Farm*	3	110	–	1474,37	–
Иные виды использования/Other use	8	4603	826	1851,34	12990
Всего/Total	107	2838	3177,3	3499,17	1890

*Прочерк – количество значений недостаточно для определения медианы.

*Dashes – the number of values is not enough to determine the median.

Установлено, что наибольшую площадь имеют объекты с ВРИ под «Иные виды использования» (4603 га), но их медианное значение существенно ниже среднего (826 га). Аналогичная ситуация с таким ВРИ, как сельхозпроизводство, в котором также задействованы большие площади земель (среднее значение – 4402 га, медианное – 472,5 га). Меньшими площадями характеризуются объекты сельского хозяйства и угодья (среднее значения 2569 га, с медианное – 1819 га). Минимальные средние значения площади имеют ОЦПСХУ с видами использования: «Личное подсобное хозяйство» (127 га), «Фермерское хозяйство» (110 га) и «Под пасеку» (6 га).

Для выявления общих закономерностей влияния ВРИ на размеры площади ОЦПСХУ проведён однофакторный непараметрический анализ Kruskal–Wallis. Установлено, что они влияют на размеры угодий,

которые достоверно (при $p < 0,05$) распределены на две группы. В первую группу вошли участки «Для сельхозпроизводства», «Объекты сельского хозяйства и угодья», «Иные виды использования»; во вторую группу – «Личное подсобное хозяйство» и «Под пасеку». Также выявлено влияние ВРИ на стоимость ОЦПСХУ (при $p < 0,05$). Земли с использованием «Под пасеку» достоверно отличаются по стоимости от земель «Сельхозпроизводства», «Объекты сельского хозяйства и угодья» по цене за гектар при $p < 0,05$.

На наш взгляд, сложившаяся ситуация объяснима тем, что земельные участки с ВРИ «Под пасеку» обычно расположены на неудобьях (в пойме реки, в лесу или на лугу). Их законодательно рекомендованная цена составляет 1300 р./га, реальная в 6,5 раз выше (8416,87 р./га). Эти земли попадают в группу 3: «Земли с.х. назначения, занятые зданиями, строени-

ями, сооружениями, используемыми для производства, хранения и первичной переработки с.-х. продукции [11, 33]», стоимость которых на 80 % выше, чем земель «Земли для сельхозпроизводства». Более дорогими являются земли для «Развития учебного хозяйства» (1367 р./га) и «Для фермерского хозяйства» (1474 р./га).

Выявлены и систематизированы особенности формы и внутренней структуры ОЦПСХУ в Томской области (рис. 4). Установлено, что 38 % из них имеют сложную конфигурацию и относятся к группе 4; к группе 2 относится 31 % участков. В большинстве случаев такие угодья содержат в границах необрабатываемые участки (лес и/или резкие изменения рельефа), в то время как в ОЦПСХУ с неоднородной структурой необрабатываемые участки являются вкраплениями (группы 3 и 4). Включённые в общую площадь угодий, они повышают их кадастровую стоимость, но в производстве не используются и, соот-

ветственно, прибыли не приносят. Таким образом, ОЦПСХУ группы 2 являются менее выгодными для правообладателя, чем угодья групп 3 и 4, однако однородные участки более удобны для ведения Единого государственного реестра недвижимости, так как определение их границ и площади проще, чем для неоднородных участков.

Конфигурацию, близкую к правильной, имеют 22 % участков (группа 1). Из них 75 % участков имеют площадь до 1 га, у 60 % ВРИ – для личного подсобного хозяйства. Меньше всего ОЦПСХУ относится к группе 3 «участки неправильной формы, неоднородные» – 9 %. Это объяснимо включением небольшого числа вкраплений в общую площадь участка для удобства регистрации в Едином государственном реестре недвижимости. Наибольшее число ОЦПСХУ (55 %) имеет значение коэффициента компактности в пределах 1,0–1,5; всего 5 % – коэффициент компактности, равный 1.



Рис. 4. Форма и структура ОЦПСХУ Томской области: А) соотношение участков разных групп конфигурации и структуры, %; Б) соотношение факторов, определяющих конфигурацию и структуру угодий, %

Fig. 4. Form and structure of the Tomsk region: A) the ratio of sites of different groups of configuration and structure, %; B) the ratio of factors that determine the configuration and structure of land, %

Наиболее распространённой причиной неправильной конфигурации участков является граница с лесным участком (65 %); влияние дорог и водных объектов оценивается в 15 %; границ населённых пунктов и чересполосицы в 2–3 %. Неоднородность структуры участков ОЦПСХУ во многом вызвана наличием вкраплений, обусловленных резким изменением рельефа и заустариванием или залесением территории. Вкрапления создают технологические сложности при обработке земель, поскольку с.-х. техника вынуждена их объезжать. Выравнивание, выкорчевывание деревьев и кустарников являются сложным и дорогостоящим мероприятием, проводимым в случае окупаемости затрат при использовании земель.

Для выявления влияния фактора положения на элементах сравнивали стоимости ОЦПСХУ, расположенных на плакоре и террасе, с участками в пойме реки по тесту Kruskal–Wallis. Установлено, что пойменные участки имеют минимальные размеры участков и минимальную стоимость гектара земли (при $p < 0,05$). Цена цельного участка всегда выше, чем фрагментированного, однако степень фрагментации на стоимость гектара земли не влияет.

Достоверное влияние на стоимость ОЦПСХУ оказывает и вид угодий: болото, пашня, луг, лес, ферма (строения). С верховым болотом оказался связанным лишь один объект – участок для геологической разведки на землях лесного фонда. Достоверные разли-

чия по стоимости гектара выявлены между угодьями «Луг» и «Пашня». Участки под лугами, лесом и под строениями отличаются более высокой стоимостью (при $p < 0,05$).

Влияние вида угодий на площадь ОЦПСХУ достоверно высоко (при $p < 0,05$). Размеры пашни многократно больше, чем других с.-х. угодий. Как по стоимости, так и по размерам участки «Пашня» отличаются от «Луга», «Леса» и «Территории под строениями (ферма)».

Тест Mann–Whitney показал – как правило, крупные по площади участки ОЦПСХУ пересекает дорога (при $p < 0,05$). Участки ОЦПСХУ, расположенные вблизи населённого пункта, имеют большую площадь (при $p < 0,05$), но это не отражается на стоимости гектара земли. Форма участка достоверно влияет на стоимость гектара земли (при $p < 0,05$) – чем ближе форма участка к квадрату, тем выше его стоимость. Стоимость участков «Под пасеку» и «Для сенокошения» оказалась явно завышенной. Причиной этого, на наш взгляд, является не их высокая природная ценность, а попадание в 3 группу «Для предпринимателей». При достаточно малой площади их формы обычно прямоугольные, что опосредованно влияет на стоимость земель.

Для изучения зависимостей между переменными использован коэффициент корреляции Спирмена. Отмечена тенденция падения стоимости одного гектара с ростом площади участка ($r = -0,32$ при $p < 0,05$). Наблюдается положительный коэффициент корреляции между площадью и фрагментацией (количеством частей) участка ($r = 0,43$ при $p < 0,05$), что указывает на рост вероятности его раздела по мере укрупнения.

Географические координаты участка, выраженные в градусах, слабо отражаются в стоимости. Заметна тенденция снижения стоимости участков с ростом широты в направлении с юга на север ($r = -0,45$ при $p < 0,05$). Тенденция объяснима расположением наиболее ценных по природному потенциалу с.-х. угодий на юге и его снижением к северу. Аналогично изменяется и площадь участка ($r = 0,42$ при $p < 0,05$).

Определено расстояние от каждого участка до областного, районных центров и ближайших крупных населённых пунктов. Оказалось, что этот географический фактор не влияет на площадь и стоимость участков, т. е. не определяет наделение земель статусом ОЦПСХУ. Тест Kruskal–Wallis показывает большую удалённость от областного центра пойменных участков относительно плакорных (при $p < 0,05$).

Таким образом, предложенные статистический и геоэкологический подходы изучения свойств участков ОЦПСХУ позволяет объективно оценивать факторы, влияющие на размеры и стоимость земель этого статуса. Они показывают, что с высокой вероятностью статусом ОЦПСХУ наделяют малопродуктивные и малоценные земли, высокая стоимость которых обусловлена субъективными причинами.

Заключение

Показана необходимость научно обоснованного геоэкологического подхода к изучению свойств ОЦПСХУ, в частности, расширение комплекса пока-

зателей для оценки их состояния и стоимости. Земли с похожим статусом имеют аналог в США – Farmland Protection Policy Act – FPPA (земли, которые нуждаются в защите, в условиях активной урбанизации естественных территорий).

Наряду с действующими правовым, функциональным и экономическим предлагается использовать пространственные, структурные, геоэкологические и иные подходы. Ценную информацию несут виды разрешенного использования, площадь, число участков, коэффициент компактности, однородность внутренней структуры, тип почвы, плодородие, балл бонитета, наличие дороги, расстояния до населённого пункта и до административного центра.

Установлено, что в Томской области ОЦПСХУ сосредоточены в южной части и практически отсутствуют на севере. Наиболее часто встречаются особо ценные угодья (55 %), имеющие кадастровую стоимость не более 20 тыс. р./га, 27 % – 20–40 тыс. р./га, 13 % – 41–140 тыс. р./га. Наиболее распространена стоимость в 18,9 р./га, которая всего лишь на 500 р. (2,6 %) превышает среднюю кадастровую стоимость земель сельскохозяйственного назначения в Томской области. Важнейшее условие выделения угодий в особо ценные продуктивные (значительное превышение средней стоимости сельскохозяйственных угодий) не выполняется.

Треть из изученных участков имеет сложную конфигурацию и многочисленные вкрапления, столько же – сложную форму и однородную структуру; остальные близкую к правильной или неправильную. Неоднородная структура ОЦПСХУ вызвана резким изменением рельефа, заустариванием или залесением территории. Правильной, технологически наиболее выгодной, формой обладают лишь 5 % угодий. Установлено, чем более правильную форму (близкую к квадрату) имеет участок, тем выше его стоимость.

Отмечено, что в направлении с юга на север Томской области стоимость и площадь земельных участков снижаются. На площадь и стоимость участков оказывает достоверное воздействие вид их разрешенного использования. Отсутствует достоверная корреляция между стоимостью участков и крайне важными с хозяйственной точки зрения показателями (фрагментация, наличие дороги, геоэкологические факторы (плакор, склон, пойма). Это препятствует объективной оценке ОЦПСХУ и их эффективному использованию.

Таким образом, проведенный анализ обосновывает необходимость комплексного междисциплинарного подхода к выделению и использованию ОЦПСХУ на основе методов, принятых в землеустройстве. Выявленные закономерности в разной степени свойственны и другим регионам, действующим в рамках единого нормативно-правового поля; поэтому предложенный подход можно рекомендовать в качестве достаточного универсального для придания землям статуса ОЦПСХУ.

Работа выполнена в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- European Commission. Structure and dynamics of EU farms: changes, trends and policy relevance // *EU Agricultural Economics Briefs*. – Brussels, 2013. – № 9. – 120 p.
- Kostin K.V. Investment attractiveness assessment of global Russian companies // *Journal of Economics Studies and Research*. – 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/330681427_Investment_Attractiveness_Assessment_of_Global_Russian_Companies (дата обращения: 12.04.2020).
- World Economic Situation and Prospects. – 2019. URL: <https://www.un.org/development/desa/dpad/publication/world-economic-situation-and-prospects-2019/> (дата обращения: 12.04.2020).
- Land administration for sustainable development / I. Williamson, S. Enemark, J. Wallace, A. Rajabifard. – India: ESRI Press Academic, 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/242494736_Land_Administration_for_Sustainable_Development (дата обращения: 12.04.2020).
- Policy guide on agricultural land preservation // *American Planning Association*. – 1999. URL: <https://www.planning.org/policy/guides/adopted/agricultural.htm> (дата обращения: 12.04.2020).
- Особенности использования сельскохозяйственных угодий // Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 18.03.2020). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/87d8483f3432f9be9ff4c44bfe3d1d57c4313807 (дата обращения: 12.04.2020).
- Стратегия научно-технологического развития России до 2035 года. – 2016. URL: <http://online.mai.ru/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F%D0%9D%D0%A2%D0%A0%D0%A0%D0%A4.pdf> (дата обращения: 12.04.2020).
- Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации. Указ президента Российской Федерации от 21.01.2020 URL: <http://docs.cntd.ru/document/564161398> (дата обращения: 12.04.2020).
- Prime & Other Important Farmlands Definitions // *Natural Resources Conservation Service*. URL: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/pr/soils/?cid=nrcs141p2_037285 (дата обращения: 12.04.2020).
- Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. – 2020. URL: <http://www.fao.org/home/ru/> (дата обращения: 12.04.2020).
- Qiang Xiaoj. China vows to preserve arable and amid urbanization // *China Daily*. – 2010. URL: http://www.chinadaily.com.cn/business/2010-03/10/content_9569181.htm (дата обращения: 12.04.2020).
- Xia Li, Anthony Gar-On-Yeh Zoning land for agricultural protection by the integration of remote sensing, GIS and cellular automata // *Photogrammetric engineering and remote sensing*. – 2009. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-02454-2_12 (дата обращения: 12.04.2020).
- FAO Publications catalogue 2018. URL: fao.org (дата обращения: 12.04.2020).
- Stephani C.J. Stephani M.C. A practical introduction to zoning // *Create Space Independent Publishing Platform*. – 2011. – 95 p. URL: <https://www.goodreads.com/book/show/17660684-zoning-101> (дата обращения: 12.04.2020).
- Hirt S.A. Zoned in the USA: the origins and implications of American land-use regulation. – New York: Cornell University Press, 2014. – 245 p.
- U.S. Department of Agriculture // *Summary Report: 2010. National Resources Inventory, Natural Resources Conservation Service*. – Washington, DC: and Center for Survey Statistics and Methodology, Iowa State University, 2010. – 166 p.
- National Soil Survey Handbook (NSSH). – 2019. URL: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054242 (дата обращения: 12.04.2020).
- Enemark S., McLaren R., Van der Molen P. Land governance in support of the millennium development goals. A new agenda for land professionals // *World Bank Conference*. – Washington DC, USA, 2009. URL: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub45/figpub45.pdf> (дата обращения: 12.04.2020).
- Экономический механизм регулирования использования земель сельскохозяйственного назначения в США / С.Н. Волков, Е.С. Киевская, З.А. Волкова, Н.Г. Конокотин // *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. – 2012. – № 6 (30). – С. 32–41.
- Варламов А.А., Антропов Д.В., Сеница Ю.С. Зонирование территорий в зарубежных странах // *Московский экономический журнал*. – 2016. – № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zonirovanie-territoriy-v-zarubezhnyh-stranah> (дата обращения: 12.04.2020).
- Федеральный закон «О переводе земель или земельных участков из одной категории в другую» от 21.12.2004. № 172-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50874 (дата обращения: 12.04.2020).
- Перечень поручений по результатам проверки исполнения решений, направленных на совершенствование организации контроля за эффективностью использования сельхозземель // Официальный сетевой ресурс Президента России. – 2016. URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/52309> (дата обращения: 12.04.2020).
- Об утверждении критериев отнесения земель к особо ценным сельскохозяйственным землям: проект постановления Правительства Российской Федерации (по состоянию на 29.08.2014). URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=PNPA&n=6103&req=doc#07990552666604733> (дата обращения: 12.04.2020).
- Волков С.Н., Черкашин К.М. Отнесение земельных участков к особо ценным сельскохозяйственным землям: проблемы и пути решения // *Инновации в АПК*. – 2014. – № 3 (3) – С. 28–36.
- Захарченко А.В. О необходимости создания и ведения Красной книги почв в условиях интенсивного развития нефтяной отрасли // *Региональная экологическая политика в условиях существующих приоритетов развития нефтегазодобычи. Материалы III Съезда экологов нефтяных регионов*. – Ханты-Мансийск: Профикс, 2013. – С. 126–134.
- Pasko O.A., Mochalova T.N. Toxicity assessment of contaminated soils of solid domestic waste landfill // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21. Problems of Geology and Subsurface Development: Proc. of the XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov. – Tomsk, Russia, April 2014. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/21/1/012044/meta> (дата обращения: 12.04.2020). DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012044.
- Волков С.Н. *Землеустройство*. – М.: ГУЗ, 2013. – 992 с.
- Махт В.А., Руди В.А., Осинцева Н.В. Оценка качества и классификация земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве. – М.: Роснедвижимость, 2007. – 132 с.
- Об обороте земель сельскохозяйственного назначения в Томской области: закон Томской области от 13 октября 2003 года №135-ОЗ // Официальные ведомости Государственной Думы Томской области. – 2003. – № 23. URL: <http://docs.cntd.ru/document/951806811> (дата обращения: 12.04.2020).
- Об утверждении перечня особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий Томской области, использование которых для целей, не связанных с ведением сельского хозяйства, не допускается, за исключением случаев, установленных федеральным законодательством: постановление Администрации Томской области // Официальный интернет портал Администрации Томской области. – 2020. URL: <http://docs.cntd.ru/document/467938155> (дата обращения: 12.04.2020).
- Пасько О.А., Захарченко А.В., Поспелова Е.В. Дифференциация сельскохозяйственных угодий по площадям на примере Томского района // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 100–112.
- Черкашин К.И. *Землеустройство особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий в Российской Федерации: дис. ... канд. эконом. наук*. – М., 2016. – 198 с.
- Варламов А.А., Антропов Д.В. Зонирование территорий. – М.: Форум, 2016. – 207 с.
- Дюкарев А.Г. О зонировании Томской области по агроклиматическим условиям и почвенному плодородию / Сб. мат. и докладов Первого Агрономического собрания Томской области. – Томск: Департамент по социально-экономическому развитию села Томской области, 2016. – С. 87–92.
- Каличкин В.К. Ресурсный потенциал сельского хозяйства Томской области / Сб. мат. и докладов Первого Агрономического собрания Томской области. – Томск: Департамент по

- социально-экономическому развитию села Томской области, 2016. – С. 12–26.
36. Публичная кадастровая карта. – 2020. URL: <https://pk5.rosreestr.ru> (дата обращения: 12.04.2020).
37. Об утверждении классификатора видов разрешенного использования земельных участков: приказ Минэкономразвития России от 1 сентября 2014 года № 540 // Российская газета. – 24.09.2014. – № 217.
- Поступила: 16.05.2020 г.*

Информация об авторах

Пасько О.А., доктор сельскохозяйственных наук, кандидат биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Захарченко А.В., доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем освоения Севера Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 629.78:630.52:587/588:528.88

CADASTRAL AND GEOECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ESPECIALLY VALUABLE PRODUCTIVE AGRICULTURAL LANDS

Olga A. Pasko¹,
oap@tpu.ru

Alexander V. Zakharchenko²,
zakh.al.vic@yandex.ru

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

² Tyumen Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
86, Malygin avenue, Tyumen, 625026, Russia.

The relevance is related to the priority of protection of agricultural land, among which the most important are the especially valuable productive agricultural lands. They are a unique natural phenomenon from scientific and practical point of view, but they are evaluated very formalized. Land properties of this status are considered in geoecological coordinates.

The aim of the research is to study the cadastral and geoecological properties of especially valuable productive agricultural lands, their statistical analysis for further land monitoring and protection using the example of the Tomsk region.

Objects: 1627 land sites of the Tomsk region.

Methods: analytical, cartographic, correlation and regression analysis.

Results. The maximum number of plots of the especially valuable productive agricultural lands is in Tomsk (559 pcs.) and Kozhevnikovo (546 pcs.) districts, the most developed in agricultural respect. The largest number of especially valuable productive agricultural lands of high-cost per hectare is concentrated near Krivosheino–Molchanovo and decreases to the west and south.

The maximum average value of especially valuable productive agricultural lands cost is noted in Krivosheino and Parabel districts – 7470–8444 rubles/ha. The minimum values of the value of especially valuable productive agricultural land are typical for Kargasok (1105 rubles/ha), Bakchar (1497 rubles/ha) and Tomsk (1623 rubles/ha) districts. The influence of the type of permitted use on the value of especially valuable productive agricultural land and on its size was also revealed. Sections have a complex configuration in 38 % of cases. 22 % of the plots have a configuration that is close to the correct one. The smallest number of plots of especially valuable productive agricultural land is classified as irregular – 9 %. The more correct the shape of the plot, the higher its cost. The largest number of plots of especially valuable productive agricultural land (55 %) has a compactness coefficient value in the range of 1,0–1,5; only 5 % – a compactness coefficient equal to 1. Comparative analysis of the cost of especially valuable productive agricultural land located on plow, terrace and in the floodplain of the river revealed that floodplain plots have a lower cost compared to plow and terrace positions. Significant differences in the cost of a hectare were found between the land «Meadow» and «Arable Land». The influence of the type of land on the area of especially valuable productive agricultural land is significantly high. The presence of a road has a significant positive effect on the area of especially valuable productive agricultural land plots. The location relative to the locality also significantly positively affects the area of plots of particularly valuable productive agricultural land, but does not affect its value. There is a positive Spearman correlation coefficient between the area and fragmentation of the site, which indicates an increase in the probability of dividing the site with an increase in its area. The geographical coordinates of the site, expressed in degrees, have little effect on the value of particularly valuable productive agricultural land. There is a noticeable tendency to reduce the cost and area of land plots with increasing latitude in the direction from south to north. The distance from the land plot to regional or regional centers or large settlements does not affect its cost.

Key word:

Particularly valuable productive agricultural land, type of permitted use, area, shape, statistical analysis.

The study was carried out at Tomsk Polytechnic University as a part of the program to improve the competitiveness of Tomsk Polytechnic University.

REFERENCES

1. European Commission. Structure and dynamics of EU farms: changes, trends and policy relevance. *EU Agricultural Economics Briefs*, 2013, no. 9, 120 p.
2. Kostin K.V. Investment attractiveness assessment of global Russian companies. *Journal of Economics Studies and Research*, 2018. Available at: http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/wacc.htm (accessed 12 April 2020).
3. *World economic situation and prospects*. 2019. Available at: <https://www.un.org/development/desa/dpad/publication/world-economic-situation-and-prospects-2019> (accessed 12 April 2020).
4. Williamson I., Enemark S., Wallace J., Rajabifard A. Land administration for sustainable development. *ESRI Press Academic, India: Basic Information*, 2009. Available at: https://www.researchgate.net/publication/242494736_Land_Administration_for_Sustainable_Development (accessed 12 April 2020).
5. Policy guide on agricultural land preservation. *American Planning Association*, 1999. Available at: <https://www.planning.org/policy/guides/adopted/agricultural.htm> (accessed 12 April 2020).
6. *Osobennosti ispolzovaniya selskokhozyaystvennykh ugodiy. Zemelny kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 25.10.2001 N 136-FZ (red. ot 18.03.2020)* [Features of agricultural land use. Land code of the Russian Federation from 25.10.2001, no. 136-FZ (ed. from 18.03.2020)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/87d8483f3432f9be9ff4c44bfe3d1d57c4313807 (accessed 12 April 2020).
7. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossii do 2035 goda* [Strategy of scientific and technological development of Russia until 2035]. 2016. Available at: <http://online.mai.ru/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F%20%D0%9D%D0%A2%D0%A0%20%D0%A0%D0%A4.pdf> (accessed 12 April 2020).

8. *Ob utverzhenii Doktriny prodovolstvennoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii. Ukaz prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 21.01.2020* [Approval of the food security Doctrine of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation of 21.01.2020]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/564161398> (accessed 12 April 2020).
9. Prime Farmlands Definitions. *Natural Resources Conservation Service*. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/pr/soils/?cid=nrcs141p2_037285 (accessed 12.04.2020).
10. *Prodovolstvennaya i selskokhozyaystvennaya organizatsiya Obyedinennykh Natsiy* [Food and Agriculture Organization of the United Nations]. 2020. Available at: <http://www.fao.org/home/ru/> (accessed 12 April 2020).
11. Qiang X. China vows to preserve arable and amid urbanization. *China Daily*, 2020. Available at: http://www.chinadaily.com.cn/business/2010-03/10/content_9569181.htm (accessed 12 April 2020).
12. Xia Li, Anthony Gar-On-Yeh. Zoning land for agricultural protection by the integration of remote sensing, GIS and cellular automata. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2009. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-02454-2_12 (accessed 12 April 2020).
13. *FAO Publications catalogue*. 2018. Available at: fao.org (accessed 12 April 2020).
14. Stephani C.J., Stephani M.C. Practical Introduction. *Create Space Independent Publishing Platform*, 2011. 64 p. Available at: <https://www.goodreads.com/book/show/17660684-zoning-101> (accessed 12 April 2020).
15. Hirt S.A. *Zoned in the USA: the origins and implications of American land-use regulation*. Nea York, Cornell University Press, 2014. 245 p.
16. *U.S. Department of Agriculture. Summary Report: 2010. National Resources Inventory, Natural Resources Conservation Service*. Washington, DC, and Center for Survey Statistics and Methodology, Iowa State University, 2010. 166 p.
17. *National Soil Survey Handbook (NSSH)*. 2019. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054242 (accessed 12 April 2020).
18. Enemark S., McLaren R., Van der Molen P. Land governance in support of the millennium development goals. A new agenda for land professionals. *World Bank Conference*. Washington DC, USA, 2019. Available at: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub45/figpub45.pdf> (accessed 12 April 2020).
19. Volkov S.N., Kiev E.S., Volkova Z.A., Kanokotin N.G. The economic mechanism for regulating the use of agricultural land in the USA. *Land management, cadastre and land monitoring*, 2012, no. 6 (30), pp. 32–41. In Rus.
20. Varlamov A.A., Antropov D.V., Sinitsa Yu.S. Zoning of territories in foreign countries. *Moscow Economic Journal*, 2016, no. 4. Available at: 4/2018 <https://qje.su/nauki-o-zemle/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-4-2018-60/?print=print> DOI 10.24411/2413-046X-2018-14061 (accessed 12.04.2020). In Rus.
21. *Federalny zakon «O perevode zemel ili zemelnykh uchastkov iz odnoy kategorii v druguyu» ot 21.12.2004. № 172-FZ* [Federal Law «On the transfer of land or land from one category to another» dated 21.12.2004. no. 172-FL]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50874 (accessed 12 April 2020).
22. Perechen poruchenij po rezul'tatam proverki ispolneniya resheniy, napravlenykh na sovershenstvovaniye organizatsii kontrolya za effektivnostyu ispolzovaniya selkhozemel [List of instructions on the results of verification of the execution of decisions aimed at improving the organization of control over the efficiency of agricultural land use]. *Ofitsialny setevoy resurs Prezidenta Rossii* [The official network resource of the President of Russia]. 2016. Available at: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/52309> (accessed 12 April 2020).
23. *Ob utverzhenii kriteriyev otneseniya zemel k osobo tsennym selskokhozyaystvennym zemlyam: projekt postanovleniya Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii (po sostoyaniyu na 29.08.2014)* [On approval of criteria for classifying land as particularly valuable agricultural land: draft resolution of the Government of the Russian Federation (as of 29.08.2014)]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=PNPA&n=6103&req=doc#07990552666604733> (accessed 12 April 2020).
24. Volkov S.N., Cherkashin K.M. The assignment of land to particularly valuable agricultural land: problems and solutions. *Innovation in the agricultural sector*, 2014, no. 3 (3), pp. 28–36. In Rus.
25. Zakharchenko A.V. O neobkhodimosti sozdaniya i vedeniya Krasnoy knigi pochv v usloviyakh intensivnogo razvitiya nefteyanoy ot-rasli [About the need to create and maintain a Red Book of soils in the conditions of intensive development of the oil industry]. *Regionalnaya ekologicheskaya politika v usloviyakh sushchestvuyushchikh prioritetov razvitiya neftegazodobychi* [Regional environmental policy in the context of existing priorities for the development of oil and gas production. Materials of the III Congress of Ecologists of the Oil Regions]. Khanty-Mansiysk, Prefix Publ., 2013. pp. 126–134.
26. Pasko O.A., Mochalova T.N. Toxicity assessment of contaminated soils of solid domestic waste landfill. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014. Vol. 21. Problems of Geology and Subsurface Development. Proc. of the XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov. Tomsk, Russia, April 2014. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/21/1/012044/meta> (accessed 12 April 2020). DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012044.
27. Volkov S.N. *Zemleustroystvo* [Land Management]. Moscow, GUZ Publ., 2013. 992 p.
28. Makht V.A., Rudy V.A., Osintseva N.V. *Otsenka kachestva i klassifikatsiya zemel po ikh prigodnosti dlya ispolzovaniya v selskom khozyaystve* [Quality assessment and classification of land according to their suitability for use in agriculture]. Moscow, Rosnedvizhimost Publ., 2007. 132 p.
29. Ob oborote zemel selskokhozyaystvennogo naznacheniya v Tomskoy oblasti: zakon Tomskoy oblasti ot 13 oktyabrya 2003 goda № 135-OZ [On the turnover of agricultural land in the Tomsk Region: Law of the Tomsk Region dated October 13, 2003 No. 135-OZ]. *Ofitsialnye vedomosti Gosudarstvennoy Dumy Tomskoy oblasti* [Official Gazette of the State Duma of the Tomsk Region]. 2003, no. 23. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/951806811> (accessed 12 April 2020).
30. Ob utverzhenii perechnya osobo tsennykh produktivnykh selskokhozyaystvennykh ugodiy Tomskoy oblasti, ispolzovanie kotorykh dlya tseley, ne svyazannykh s vedeniem selskogo khozyaystva, ne dopuskaetsya, za isklucheniem sluchayev, ustanovlennykh federalnym zakonodatel'stvom: postanovlenie Administratsii Tomskoy oblasti [On approval of the list of especially valuable productive agricultural lands of the Tomsk region, the use of which for purposes not related to agriculture is not allowed, except in cases established by federal law: Resolution of the Administration of the Tomsk Region]. *Ofitsialny internet portal Administratsii Tomskoy oblasti* [Official Internet portal of the Administration of the Tomsk Region]. 2020. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/467938155> (accessed 12 April 2020).
31. Pasko O.A., Zakharchenko A.V., Pospelova E.V. Differentiation of agricultural land by area on the example of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering*, 2019, vol. 330, pp. 100–112. In Rus.
32. Cherkashin K.I. *Zemleustroystvo osobo tsennykh produktivnykh selskokhozyaystvennykh ugodiy v Rossiyskoy Federatsii*. Dis. kand. nauk [Land management of especially valuable productive agricultural land in the Russian Federation. Cand. Diss.]. Moscow, 2016. 198 p.
33. Varlamov A.A., Antropov D.V. *Zonirovaniye territoriy* [Zoning of territories]. Moscow, Forum Publ., 2016. 207 p.
34. Dyukarev A.G. O zonirovani Tomskoy oblasti po agroklimalicheskim usloviyam i pochvennomu plodorodiyu [On zoning of the Tomsk region by agroclimatic conditions and soil fertility]. *Sbornik materialov i dokladov Pervogo Agronomicheskogo sobraniya Tomskoy oblasti* [Collection of materials. and reports of the first Agronomic meeting of the Tomsk region. Tomsk, Department for socio-economic development of the village of Tomsk region, 2016. pp. 87–92.
35. Kalichkin V.K. Resursnyy potentsial selskogo khozyaystva Tomskoy oblasti [Resource potential of agriculture of the Tomsk region]. *Sbornik materialov i dokladov Pervogo Agronomicheskogo sobraniya Tomskoy oblasti* [Collection of materials. and reports of the first Agronomic meeting of the Tomsk region. Tomsk, Department for socio-economic development of the village of Tomsk region, 2016. pp. 12–26.

36. *Publichnaya kadastraya karta* [Public cadastral map]. Available at: <https://pkk5.rosreestr.ru> (accessed 12 April 2020).
37. Ob utverzhdenii klassifikatora vidov razreshennogo ispolzovaniya zemelnykh uchastkov: prikaz Minekonomrazvitiya Rossii ot 1 sentyabrya 2014 goda № 540 [On the approval of the classifier of types of permitted use of land: Order of the Ministry of Economic

Development of Russia of September 1, 2014 No. 217]. *Rossiyskaya gazeta*, 24.09.2014, no. 217.

Received: 16 May 2020.

Information about the authors

Olga A. Pasko, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander V. Zakharchenko, Dr. Sc., leading researcher, Tyumen Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.279.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В ГАЗОПРОВОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИКЛОНОВ

Зятиков Павел Николаевич¹,
zpavel@tpu.ru

Волков Павел Валерьевич^{2,1},
tpuipr@mail.ru

Большунов Артем Владимирович¹,
tpuiprgnm@mail.ru

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

² АО ТомскНИПинефть,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью уменьшения количества гидратов газа в потоке смеси или их полного разрушения. Газовые гидраты являются крайне негативным фактором газовой промышленности, они усложняют все стадии подготовки, транспортировки и переработки сырья. Гидраты аккумулируются на стенках сосудов при определенных термобарических условиях, также их скопление наблюдается в полостях арматуры, что может привести к их преждевременному износу или повышению гидравлического сопротивления потока флюида, а следовательно, повышению энергетических затрат. Существующие методы борьбы с гидратообразованием очень опасны (применение метанола для разрушения гидратов), очень затратны (применение ингибиторов гидратообразования) или энергозатратны и малоэффективны (прогрев трубопровода специализированным кабелем). Также отложения гидратов могут негативно сказываться на приборах учета и замера.

Цель: экспериментальное исследование процесса удаления из потока газа льда и его разрушения на специализированной установке.

Объект: автономная модульная установка для борьбы с гидратообразованием.

Методы: теоретические методы для обоснования закономерности течения процессов тепломассообмена, расчетно-аналитический метод для определения количества энергии, практические методы по проведению экспериментов.

Результаты. Построен лабораторный стенд на базе Национального исследовательского Томского политехнического университета, проведены эксперименты для различных потоков газа с разными термобарическими условиями, проанализированы основные зависимости качества отделения льда из смеси, доказана практическая значимость разработки и даны рекомендации для создания опытного образца. Рассмотрена модель расчета основных конструктивных параметров циклона, рабочей полости. Представлена методика проведения экспериментов и техники подбора оптимальных термобарических параметров.

Ключевые слова:

Гидратообразование, циклон, газодинамический метод, тепломассообмен, динамика.

Введение

В девятнадцатом столетии гидраты были очень плохо изучены. Цель исследований была посвящена определению химических соединений, которые способны образовывать гидраты, и термобарических параметров, которые необходимы для прохождения реакции [1]. В этот период времени было открыто большое количество гидратообразующих веществ. Только в двадцатом веке газовые гидраты были точно определены и указали на свою важность в промышленной отрасли [2–4].

В газовой промышленности гидраты служат крайне негативным фактором. Их присутствие в потоке смеси замедляет добычу флюида, его транспортировку и сильно усложняет подготовку конечного продукта [5]. При определенных параметрах газовые гидраты аккумулируются на стенках и полостях сосудов, что дает дополнительное гидравлическое сопротивление и уменьшает их срок службы. Присутствие гидратов на установке комплексной подготовки газа и

конденсата (УКПГ) негативно сказывается на технологическом процессе и режиме подготовки, что влечет за собой снижение качества конечного продукта [6–9].

Для эффективной борьбы с отложениями гидратов необходимо комплексно учитывать все параметры и условия их образования и диссоциации [10–12]. Система расчета должна быть адаптивной, потому что величина температуры, давления, расхода и компонентного состава непостоянны [13, 14]. Для решения всех практических задач необходимо иметь детальную физико-математическую модель, учитывающую условия эксплуатации и разработки [15, 16].

Объектом исследования является автономная модульная установка, на которой проводились эксперименты по отделению льда.

Исследования выполнены на базе Томского политехнического университета путем проведения более 500 экспериментов с различными термобарическими параметрами. Результаты и выводы представлены в виде графиков и аналитического обзора.

Расчет физико-математической модели возможного образования гидратов на участке трубопровода

Для построения физической модели применения установки необходимо рассчитать вероятность образования гидратов на участке. Для этого вносятся основные данные от нефтегазодобывающей компании или компании по транспортировке углеводородного сырья (табл. 1, 2) [17–19].

Таблица 1. Начальный компонентный состав газа

Table 1. Initial component composition of gas

Компонент Component	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₀	CO ₂	N ₂
Доля, % Part, %	84,52	5,82	5,03	1,94	0,57	1,47	0,65

Таблица 2. Начальные параметры смеси газа и параметры трубопровода

Table 2. Initial parameters of gas mixture and parameters of pipeline

Параметр/Parameter	Значение Value
Длина участка трубопровода, км Pipeline length, km	$\ell_{KC}=141,25$
Давление смеси на входе в трубопровод, давление на выходе, МПа Fluid pressure at the entrance to the pipeline, the pressure at the outlet of the system, MPa	$P_H=6,5$ $P_K=3$
Справочное значение теплоемкости газа, Дж/(кг·К) Reference value of gas heat capacity, J/(kg·K)	$C_p=2816,46$
Плотность рассматриваемого газа при стандартных условиях, кг/м ³ Density of the gas in question under standard conditions, kg/m ³	$\rho_{CT}=0,8580$
Температура воздуха окружающей среды, К Ambient temperature	$T_0=276$
Значение коэффициента Джоуля–Томсона, К/МПа Value of the Joule–Thomson coefficient, K/MPa	$Di=3,191$
Расход газа при заданных начальных параметрах, млн м ³ /сут Gas consumption at given initial parameters, million m ³ /day	$Q=6,823$
Средний коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К) Average heat transfer coefficient, W/(m ² ·K)	$K_{CP}=1,244$
Относительная плотность газа по воздуху Relative gas density in air	$\Delta=0,62$
Внутренний диаметр трубопровода, мм Value of the inner diameter of the pipeline, mm	$D_{вн}=400$
Температура газа в трубопроводе, К Gas temperature in pipeline, K	$T_{CP}=298,932$
Начальная температура газа в трубопроводе, К Initial gas temperature in pipeline, K	$T_H=315$

После проведения расчетов по методике Шухова были получены основные аналитические данные (табл. 3) и отображены графические результаты (рис. 1).

Из графических данных делаем вывод, что при данной эксплуатации температура среды на пятом участке трубопровода ниже, чем температура гидратообразования. Следовательно, этот участок считается началом зоны гидратообразования [20]. До конца протяженности трубопровода (на участках 6–10) во

внутренней полости будет происходить аккумулярование гидратов. Для недопущения образования гидратных пробок или скопления гидратов на различных участках, что может привести к снижению общего расхода газа, выхода из строя оборудования или остановки потока, необходимо провести мероприятия по предотвращению гидратообразования.

Таблица 3. Данные по участкам трубопровода

Table 3. Data of pipeline part

Участок Local	Давление, МПа Pressure, MPa	Температура газа, К Gas temperature, K	Температура точки росы газа, К Gas dew point temperature, K	Температура равновесного гидратообразования Temperature of equilibrium hydrate
0,1	6,24	292,27	272,68	285,19
0,2	5,97	289,97	272,07	284,83
0,3	5,68	287,82	271,40	284,44
0,4	5,38	285,81	270,66	284,00
0,5	5,06	283,92	269,83	283,51
0,6	4,72	282,15	268,89	282,95
0,7	4,36	280,49	267,80	282,31
0,8	3,96	278,94	266,50	281,53
0,9	3,51	277,48	264,91	280,57
1	3,00	276,11	262,82	279,31

Экспериментальный стенд для борьбы с гидратообразованием

Установка теплового газодинамического воздействия для предотвращения гидратообразования имеет пропускную способность не более 50 м³/час газа. Схема экспериментального стенда для борьбы с гидратообразованием (льдом в опытных экспериментах) представлена на (рис. 2). Главные задачи, которые необходимо было определить практическим путем с помощью предложенной установки:

- расчет оптимального количества льда для подачи на установку, которое обеспечит максимальную производительность и степень захвата частиц льда;
- определение оптимальных параметров газодинамического потока внутри полости аппарата и конструкции циклона;
- задание оптимальных рабочих параметров процесса для проведения экспериментов [21].

В приемную воронку – 1 подается лед (наиболее близкий по своим химическим свойствам к гидратам элемент) с размерностью частиц до 7 мм. От компрессора, проходя через регулятор давления – 3, подается сжатый воздух с требуемым давлением на эжектор – 2. В результате такого воздействия образуется движение потока газа с частицами льда по транспортной трубе ($D_y=20$ мм), затем двухфазный поток поступает в прямоточный циклон – 5, где отделяются частицы льда из потока и направляются в форбункер с подогревом – 6, где лед (в реальной системе – гидрат) разрушается. Конструктивная особенность данного элемента системы указана на (рис. 3).

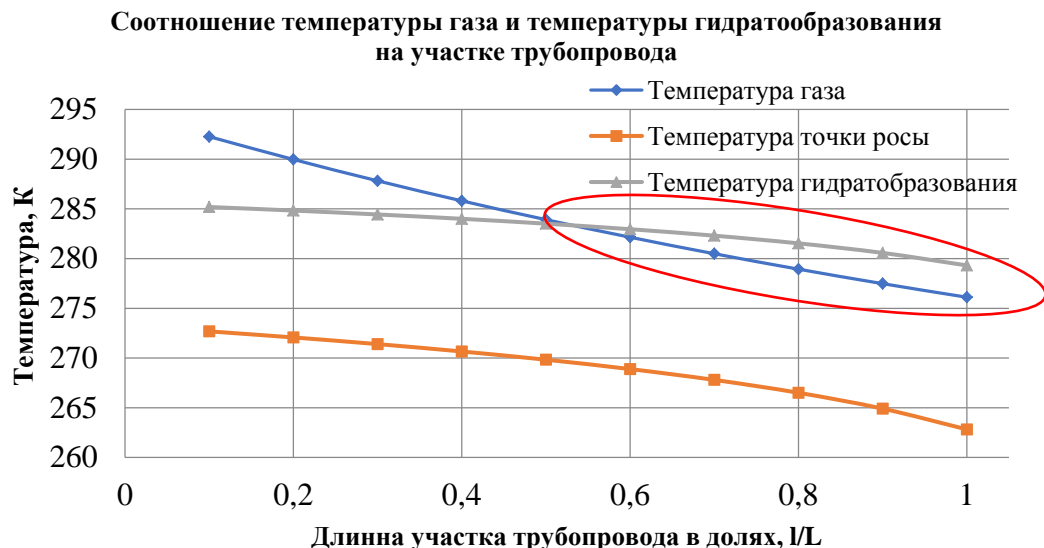


Рис. 1. Результаты расчетов по соотношению температур

Fig. 1. Results of calculations by ratio of temperatures

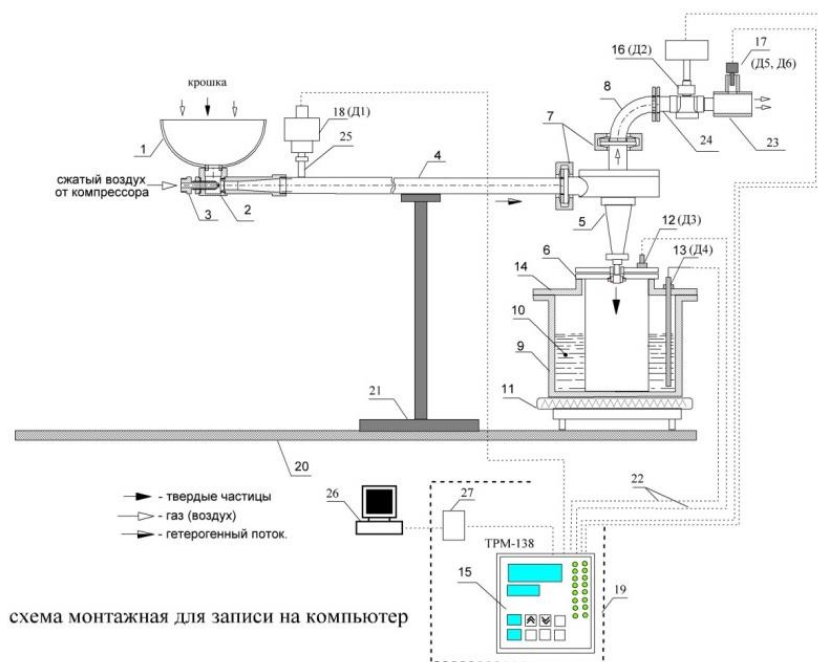


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – воронка приемная; 2 – эжектор с кольцевым соплом; 3 – переходник 27/20 мм; 4 – труба транспортная Ду 20 мм; 5 – циклон с крышкой; 6 – форбункер; 7 – замки; 8 – колено Ду 20 мм; 9 – сосуд с жидкостью; 10 – жидкость (глицерин); 11 – электроплитка 220 В; 12 – датчик температуры газа (ДТС 014-50М.В3.20/1); 13 – датчик температуры жидкости (ДТС 014-50М.В3.20/1); 14 – крышка сосуда; 15 – модуль ввода аналоговый MB 110-224.8А; 16 – электронный датчик разности давлений (ДМ5007А-ДД); 17 – совмещенный датчик влажности и температуры, ДВТ-02 (4–20 мА); 18 – электронный датчик давления (4–20 мА); 19 – шкаф системы управления; 20 – столешница монтажная; 21 – штатив; 22 – электрические линии связи; 23 – спрямляющая труба с гнездом посадки влагомера; 24 – переходное крепление; 25 – муфта крепления датчика давления; 26 – компьютер; 27 – преобразователь интерфейса RS-485 (AC-4)

Fig. 2. Scheme of the experimental stand: 1 – receiving funnel; 2 – ejector with annular nozzle; 3 – transition 27/20 mm; 4 – transport pipe Ду 20 mm; 5 – cyclone with cover; 6 – forbunker; 7 – locks; 8 – transition Ду 20 mm; 9 – vessel with liquid; 10 – liquid (glycerol); 11 – electric stove 220 V; 12 – gas temperature sensor (DTC 014-50M.B3.20/1); 13 – liquid temperature sensor (DTC 014-50M.B3.20/1); 14 – vessel cover; 15 – analog input module MB 110-224.8A; 16 – differential pressure sensor (DM 5007A-DD); 17 – combined humidity and temperature sensor, DVT-02 (4–20 mA); 18 – electronic pressure sensor (4–20 mA); 19 – block of control system; 20 – countertop; 21 – tripod; 22 – electric communication lines; 23 – straightening tube with hygrometer landing socket; 24 – mount; 25 – coupling of pressure sensor mounts; 26 – computer; 27 – interface convertor RS-485 (AC-4)

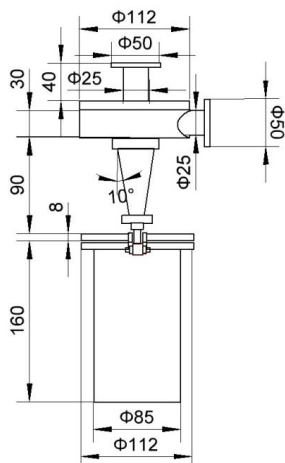


Рис. 3. Система прямоточный циклон – форбункер

Fig. 3. Cyclone-forbunker system

Диаметр сечения сопла для проведения экспериментов: 1–5 мм. Газ продолжает движение дальше, где выходит из системы. Датчики – 12, 13 измеряют температуру среды и температуру теплоносителя для оценки необходимого количества подводимой энергии, датчик – 18 измеряет давление в системе на начальном этапе эксперимента. Датчик – 17 измеряет влагосодержание воздуха, датчик – 18 – общий расход смеси в системе. Все данные в режиме реального времени передаются на компьютер – 26 и в соответствии с методом, описанным в [14], производится мгновенный расчет. Для обработки информации и интерпретации результатов используется алгоритм, описанный в [22], для получения точных и адаптированных значений термобарических параметров эксперимента.

Расчет параметров циклона

Из [14] необходимо определить оптимальную скорость течения $\vartheta_0 = 3,5$ м/с для рассматриваемого циклона, после этого по формуле, представленное ниже рассчитать достаточную площадь сечения заданного циклона:

$$S = \frac{L}{3600 \cdot \vartheta_0},$$

где L – известный объем выбросов, проходящих через циклон, м³/ч;

$$S = \frac{15}{3600 \cdot 3,5} = 0,0012 \text{ м}^2.$$

Рассчитываем диаметр циклона (D), учитывая, что число циклонов $n = 1$, м:

$$D = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{S}{n}};$$

$$D = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{0,0012}{1}} = 0,0389 \text{ м}.$$

Из [14] выбираем нормируемый диаметр $D_1=0,04$ м.

Определяем действительную скорость потока смеси в циклоне:

$$\vartheta'_0 = \frac{1,27 \cdot L}{3600 \cdot n \cdot D_1^2};$$

$$\vartheta'_0 = \frac{1,27 \cdot 0,0012}{3600 \cdot 1 \cdot 0,04^2} = 3,307 \text{ м/с}.$$

Действительная скорость движения частиц в циклоне не может отличаться от оптимальной более чем на 15 %:

$$\Delta = \frac{\vartheta_0 - \vartheta'_0}{\vartheta_0} \cdot 100\%;$$

$$\Delta = \frac{\vartheta_0 - \vartheta'_0}{\vartheta_0} \cdot 100\% = \frac{3,5 - 3,3}{3,3} = 5,5\%.$$

Для дальнейшего расчета из справочных данных [14] выбираем компоновку циклонов. В соответствии с этими данными определяем коэффициент местного сопротивления $\Delta \varepsilon_0 = 60$. Определяется динамическая вязкость воздуха для рабочих условий (μ), Па/с:

$$\mu = 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{273+t}{273} \right)^{0,683},$$

где t – температура окружающей среды в °С.

$$\mu = 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{273+20}{273} \right)^{0,683} = 1,83 \cdot 10^{-5} \text{ Па/с}.$$

Также необходимо рассчитать аэродинамическое сопротивление прямоточного циклона ($\Delta P_{\text{ц}}$), Па, по формуле:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \xi_{\text{ц}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{в}} \cdot \vartheta_0'^2}{2} \right),$$

где $\rho_{\text{в}} = 0,646$ – сопротивление потока воздуха; $\xi_{\text{ц}}$ – коэффициент местного сопротивления, который отнесен к скорости ϑ'_0 и определен с учетом поправочных коэффициентов по формуле:

$$\xi_{\text{ц}} = k_1 \cdot k_2 \cdot \xi_0 + \Delta \xi_0,$$

где $\Delta \xi_0$ – коэффициент, зависящий от вариации компоновки циклона по справочным данным [14]; k_1 – коэффициент, зависящий непосредственно от диаметра проходного отверстия циклона [14]; k_2 – справочный коэффициент из [14] для учета запыленности воздуха; ξ_0 – коэффициент местного сопротивления из [14]:

$$\xi_{\text{ц}} = 0,94 \cdot 0,95 \cdot 5,25 + 60 = 64,68;$$

$$\Delta P_{\text{ц}} = 64,68 \cdot \left(\frac{0,646 \cdot 3,3^2}{2} \right) = 255,95 \text{ Па}.$$

По графику фракционной эффективности очистки из [14] определяем размер частиц d_{50} с эффективностью улавливания 97,8 % для выбранного типа циклона с D_1 . Для определения эффективности циклона других размеров и скорости движения воздуха, его вязкости и плотности вычисляют новое значение d'_{50} мкм по формуле:

$$d'_{50} = 548,5 \cdot d_{50} \cdot \sqrt{\frac{D_1 \cdot \mu \cdot \vartheta_0}{Pn \cdot \vartheta_0'}},$$

где Pn – плотность частиц ($Pn = 10 \text{ а}00 \text{ кг/м}^3$),

$$d'_{50} = 548,5 \cdot d_{50} \cdot \sqrt{\frac{0,04 \cdot 1,83 \cdot 10^{-5} \cdot 3,5}{1000 \cdot 3,3}} = 0,00413 \text{ м}.$$

Основные размеры циклона должны быть следующими:

- выходное отверстие циклона:

$$D_{\text{вых}} = 0,59 \cdot D_1 = 0,59 \cdot 0,04 = 0,025 \text{ м};$$

- размеры входного патрубка a, b :
 $a = 1,11 \cdot D_1 = 1,11 \cdot 0,04 = 0,044 \text{ м};$
 $b = 0,26 \cdot D_1 = 0,26 \cdot 0,04 = 0,01 \text{ м};$
- общая высота циклона:
 $H = 3,1 \cdot D_1 = 3,1 \cdot 0,04 = 0,124 \text{ м}.$

Проведение экспериментов

Эксперимент 1 – Определение степени отделения

Эксперимент проводился при следующих условиях: постоянное значение давление подачи воздуха $P=2$ атм., масса льда $m=150$ г, размерность частиц льда 2–4 мм, диаметр сопла $d=2$ мм, постоянный коэффициент эжекции. Температура воздуха в форбункере и температура теплоносителя поддерживаются изменением мощности нагревателя и остаются неизменными на протяжении всего эксперимента. Задача состояла в том, чтобы найти массу льда, который не отделился из потока смеси. Время проведения эксперимента от 5 до 15 секунд.

Эксперимент 2 – Определение степени отделения

Эксперимент проводился при следующих условиях: постоянное значение давление подачи воздуха $P=3$ атм., масса льда $m=150$ г, размерность частиц льда 2–4 мм, диаметр сопла $d=3$ мм, постоянный коэффициент эжекции. Температура воздуха в форбункере и температура теплоносителя поддерживаются изменением мощности нагревателя и остаются неиз-

менными на протяжении всего эксперимента. Задача состояла в том, чтобы найти массу льда, который не отделился из потока смеси. Время проведения эксперимента от 3,5 до 14 секунд.

Эксперимент 3 – Определение степени отделения

Эксперимент проводился при следующих условиях: постоянное значение давление подачи воздуха $P=4$ атм., масса льда $m=150$ г, дисперсность льда 2–4 мм, диаметр сопла $d=4$ мм, постоянный коэффициент эжекции. Температура воздуха в форбункере и температура теплоносителя поддерживаются изменением мощности нагревателя и остаются неизменными на протяжении всего эксперимента. Задача состояла в том, чтобы найти массу льда, который не отделился из потока смеси.

В первых трех экспериментах физическая задача состоит в том, чтобы определить зависимость степени отделения твердых частиц от начальной их концентрации и от объемного расхода газа. Расход газа изменяется входным давлением и диаметром сопла, концентрация льда в исходном потоке изменяется временем введения частиц в систему: m льда $=150 \text{ м/т}$ введения (г/с). Температура теплоносителя постоянна. Время проведения эксперимента от 2,7 до 11 секунд.

На рис. 4 приведены результаты экспериментов 1–3. Представлен общий график распределения зависимости степени отделения частиц льда от их начальной концентрации и от динамики потока в сравнении.

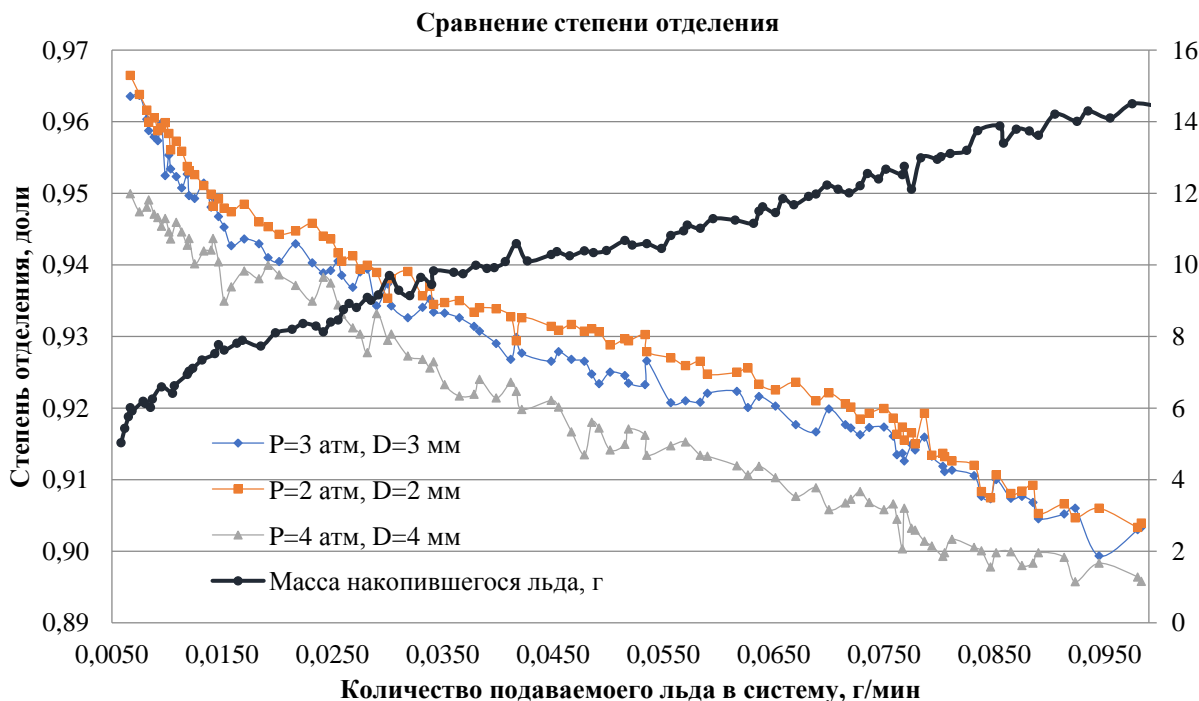


Рис. 4. Обобщенные результаты экспериментов 1–3

Fig. 4. Generalized results of the experiments 1–3

Из рис. 4 видно, что чем выше динамика потока и чем выше исходная концентрация, тем хуже происходит отделение частиц. Для проведения эксперимента

по тепловому воздействию воспользуемся моделью № 1, где произошло лучшее отделение льда из потока смеси. Экспериментально определим время восста-

новления температуры теплоносителя до его начальной температуры. Рассмотрим два температурных режима: $t_{\text{начальное}}=60^\circ\text{C}$ и $t_{\text{начальное}}=80^\circ\text{C}$.

Эксперимент 4 – Определение времени восстановления температуры теплоносителя

Эксперимент проводился при следующих условиях: постоянное значение давление подачи воздуха $P=2$ атм., масса льда $m=150$ г, дисперсность льда 2–4 мм, диаметр сопла $d=2$ мм, постоянный коэффициент эжекции. Начальная температура теплоносителя составляет 60°C . Время проведения эксперимента от 3 до 10 секунд.

Эксперимент 5 – Определение времени восстановления температуры теплоносителя

Эксперимент проводился при следующих условиях: постоянное значение давление подачи воздуха $P=2$ атм., масса льда $m=150$ г, дисперсность льда 2–4 мм, диаметр сопла $d=2$ мм, постоянный коэффициент эжекции. Начальная температура теплоносителя составляет 80°C . Время проведения эксперимента от 3 до 10 секунд.

На рис. 5, 6 графически отображены результаты эксперимента 4 и 5. На рис. 7, 8 отображены скачки температуры при попадании в систему льда для эксперимента 4 и 5 соответственно, при этом температура теплоносителя не поддерживается.



Рис. 5. Зависимость времени восстановления температуры от начальной концентрации льда ($t_{\text{начальное}}=60^\circ\text{C}$)

Fig. 5. Dependence of the temperature recovery time on the initial ice concentration ($t=60^\circ\text{C}$)



Рис. 6. Зависимость времени восстановления температуры от начальной концентрации льда ($t_{\text{начальное}}=80^\circ\text{C}$)

Fig. 6. Dependence of the temperature recovery time on the initial ice concentration ($t=80^\circ\text{C}$)

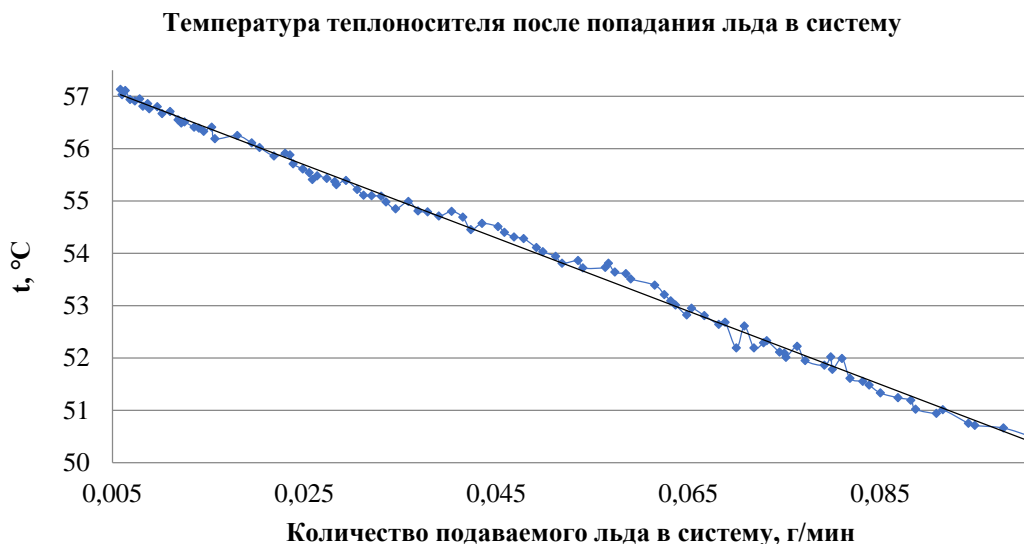


Рис. 7. Зависимость скачка температуры при попадании льда в форбункер от начальной концентрации льда ($t_{\text{начальное}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 7. Dependence of temperature jump after ice enter in forbunker on initial ice concentration ($t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)

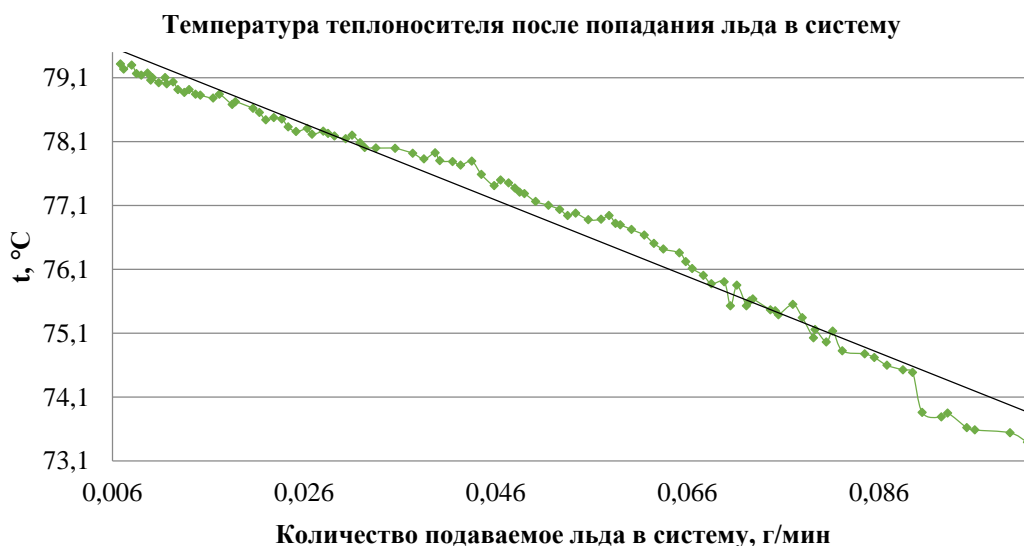


Рис. 8. Зависимость скачка температуры при попадании льда в форбункер от начальной концентрации льда ($t_{\text{начальное}}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8. Dependence of temperature jump after ice enter in forbunker on initial ice concentration ($t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Из графиков, представленных выше, видно, что чем выше температура, тем ниже начальный скачок температуры и меньше время восстановления. Самый оптимальный эксперимент при температуре теплоносителя $t_{\text{начальное}}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и концентрации порядка 0,5 г/с.

Экспериментальный стенд разработан при поддержке грантовой программы нефтегазовой компании British Petroleum.

Заключение

Создан экспериментальный стенд для борьбы с гидратообразованием, который показал эффектив-

ность практического применения аэромеханического метода воздействия для предотвращения гидратообразования. В результате проведенных экспериментов получены оптимальные термобарические параметры для проведения дальнейших исследований и выдачи рекомендаций для промышленного образца модульной вставки борьбы с гидратообразованием. Модернизирован и автоматизирован экспериментальный стенд, изучены основные зависимости и степени их влияния на технологические параметры процесса разделения и разрушения гидратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fortin G., Ilinca A., Brandi V. A new roughness computation method and geometric accretion model for airfoil icing // *Journal of Aircraft*. – 2016. – V. 41. – № 1. – P. 119–127.
2. Бешенцева С.А. Анализ методов предупреждения гидратообразования в трубопроводах // *Вестник кибернетики*. – 2017. – № 11. – С. 40–44.
3. Галимзянов М.Н. Математическое моделирование образования газовых гидратов // *Вестник Башкирского университета*. – 2018. – Т. 15. – № 3. – С. 570–574.
4. Попов Д.Н., Варфоломеева О.И., Хворенков Д.А. Особенности неизотермических течений жидкости с переменными реологическими свойствами в каналах с местными сопротивлениями // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. – 2016. – № 1 (57). – С. 146–149.
5. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2018. – 250 с.
6. Исследование гидродинамических и термодинамических процессов высоконапорного многофазного вихревого течения жидкости / Ю.М. Ахметов, Р.Р. Калимуллин, Р.Ф. Хакимов, С.Ю. Константинов, Д.В. Целищев // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 163–168.
7. Abgrall R., Saurel R. Discrete equations for physical and numerical compressible multiphase mixtures // *Journal of Computational Physics*. – 2016. – V. 186. – P. 361–396.
8. Application of numerical signal differentiation methods to determine stationarity of a process / A.V. Maystrenko, A.A. Svetlakov, T.V. Gandzha, V.V. Dmitriev, N.V. Aksenova // *Petroleum and Coal*. – 2017. – V. 59. – Iss. 3. – P. 311–318.
9. Saurel R., Petitpas F., Berry R.A. Simple and efficient relaxation methods for interfaces separating compressible fluids, cavitating flows and shocks in multiphase mixtures // *Journal of Computational Physics*. – 2017. – V. 228. – Iss. 5. – P. 1678–1712.
10. Вараксин А.В. Газодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения // *Теплофизика высоких температур*. – 2017. – № 3. – С. 421–455.
11. Волков П.В., Большунов А.В. Исследование и комплексное применение гидроаэромеханических методов для предотвращения гидратообразования при подготовке газа // *Научный журнал «Успехи современного естествознания»*. – 2017. – № 9. – С. 52–56.
12. Методы и средства предотвращения гидратообразования на объектах газодобычи / М.Ю. Прахова, А.Н. Краснов, Е.А. Хоршавина, Э.А. Шаловников // *Нефтегазовое дело*. – 2016. – № 1. – С. 101–118.
13. Запорожец Е.П., Шостак Н.А. Гидраты. – Краснодар: ИД «Юг», 2017. – 460 с.
14. Запорожец Е.П., Антониади Д.Г., Зиберт Г.К. Регулярные процессы и оборудование в технологиях сбора, подготовки и переработки нефтяных и природных газов: учебное пособие. – Краснодар: ИД «Юг», 2017. – 620 с.
15. Шагаев В.Ш., Тазетдинов Б.И. К теории разложения метастабильного газогидрата // *Теоретические основы химической технологии*. – 2017. – Т. 47. – № 4. – С. 454–463.
16. Derevich I.V. The hydrodynamics and heat transfer and mass transfer of particles under conditions of turbulent flow of gas suspension in a pipe and in an axisymmetric jet // *Journal of High Temperature*. – 2016. – V. 40. – № 1. – P. 78–91.
17. Ширшова А.В., Данько М.Ю. Рост и диссоциация газогидратов в водонефтяных эмульсиях // *Известия вузов. Сер. Нефть и газ*. – 2017. – № 5. – С. 95–101.
18. Gavriluk S.L., Saurel R. Mathematical and numerical modeling of two phase compressible flows with micro inertia // *Journal of Computational Physics*. – 2016. – V. 175. – Iss. 1. – P. 326–360.
19. Naseer M., Brandstatter W. Hydrate formation in natural gas pipelines // *WIT Transactions on Engineering Sciences*. – 2017. – V. 70. – P. 261–270.
20. An algorithm to improve the speed and accuracy of analysis of chemical process systems operation / V.V. Dmitriev, T.V. Gandzha, I.M. Dolganov, N.V. Aksenova // *Petroleum and Coal*. – 2017. – V. 59. – Iss. 3. – P. 429–441.
21. Волков П.В. Экспериментальное исследование аэромеханического метода для предотвращения гидратообразования при разработке газовых месторождений и установок комплексной подготовки газа // *Нефть и газ 2019: Сборник трудов 73-й международной молодежной научной конференции*. – М., 2019. – Т. 1. – С. 78–83.
22. Lovick J., Angeli P. Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil–water flows // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2004. – V. 30. – P. 139–157.

Поступила 17.06.2020 г.

Информация об авторах

Зятиков П.Н., доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Волков П.В., младший научный сотрудник АО ТомскНИПИнефть; аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Большунов А.В., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.279.8

EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT GAS-DYNAMICS METHOD FOR PREVENTING HYDRATE FORMATION IN GAS PIPELINES USING CYCLONES

Pavel N. Zytkov¹,
zpavel@tpu.ru

Pavel V. Volkov^{2,1},
tpuipr@mail.ru

Artem V. Bolshunov¹,
tpuiprgnm@mail.ru

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

² TomskNIPneft,
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia

The relevance of the study is caused by the need to reduce the amount of gas hydrates in the mixture stream or their complete destruction. In the oil and gas industry, gas hydrates are a negative factor, since they greatly complicate production, transportation and preparation of hydrocarbon raw materials. Under certain thermobaric conditions, hydrates precipitate and accumulate on the walls of vessels, pipelines and in the cavities of the valves, which leads to their wear and increase of hydraulic resistance, and, consequently, to increased energy costs. Existing methods to combat hydrate formation are very dangerous (using methanol to destruct hydrates), very expensive (using hydrate inhibitors) or energy consuming and not effective (heating the pipeline with a specialized cable). Also, accumulation of hydrates can adversely affect metering and metering devices.

The main aim of the research is the experimental study of removing ice from a gas stream and its destruction in a specialized installation.

Object: autonomous modular installation for combating hydrate treatment.

Methods: theoretical methods to justify the patterns of heat and mass transfer, a calculation-analytical method for determining the amount of energy, practical methods for conducting experiments.

Results. The laboratory stand was built on the basis of National Research Tomsk Polytechnic University; experiments were conducted for various gas flows with different thermobaric conditions; the main dependences of the quality of separation of ice from the mixture were analyzed; the practical significance of the development was proved; and recommendations were made for creating a prototype. A model for calculating the main structural parameters of a cyclone and a working cavity is considered. A methodology for conducting experiments and techniques for selecting optimal thermobaric parameters is presented.

Key words:

Hydrate formation, cyclone, gasodynamic method, heat and mass transfer, dynamic.

REFERENCES

- Fortin G. A new roughness computation method and geometric accretion model for airfoil icing. *Journal of Aircraft*, 2016, vol. 41, no. 1, pp. 119–127.
- Beshentseva S.A. Analysis of methods for preventing hydrate formation in pipelines. *Herald of cybernetics*, 2017, no. 11, pp. 40–44. In Rus.
- Galimzyanov M.N. Mathematical modeling of the formation of gas hydrates. *Herald of Bashkir University*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 570–574. In Rus.
- Popov D.N., Varfolomeeva O.I., Khvorenkov D.A. Features of nonisothermal fluid flows with variable rheological properties in channels with local resistances. *Herald of the Izhevsk State Technical University*, 2016, no. 1 (57), pp. 146–149. In Rus.
- Komisssarov Yu.A., Gordeev L.S., Vent D.P. *Processy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 2018. 250 p.
- Akhmetov Yu.M., Kalimullin R.R., Khakimov R.F., Konstantinov S.Yu., Tselishchev D.V. Investigation of the hydrodynamic and thermodynamic processes of high-pressure multiphase vortex fluid flow. *Herald of Ufa State Aviation Technical University*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 163–168. In Rus.
- Abgrall R., Saurel R. Discrete equations for physical and numerical compressible multiphase mixtures. *Journal of Computational Physics*, 2016, vol. 186, pp. 361–396.
- Maysrenko A.V., Svetlakov A.A., Gandzha T.V., Dmitriev V.V., Aksenova N.V. Application of numerical signal differentiation methods to determine stationarity of a process. *Petroleum and Coal*, 2017, vol. 59, Iss. 3, pp. 311–318.
- Saurel R., Petitpas F., Berry R.A. Simple and efficient relaxation methods for interfaces separating compressible fluids, cavitating flows and shocks in multiphase mixtures. *Journal of Computational Physics*, 2017, vol. 228, Iss. 5, pp. 1678–1712.
- Varaksin A.V. Hydrogasdynamics and thermophysics of two-phase flows: problems and achievements. *Thermophysics of high temperatures*, 2017, no. 3, pp. 421–455. In Rus.
- Volkov P.V., Bolshunov A.V. Research and integrated application of hydroaeromechanical methods to prevent hydrate formation during gas preparation. *Successes in modern natural sciences*, 2017, no. 9, pp. 52–56. In Rus.
- Prakhova M.Yu., Krasnov A.N., Khoroshavina E.A., Shalovnikov E.A. Methods and means of preventing hydrate formation at gas production facilities. *Oil and Gas Business*, 2016, no. 1, pp. 101–118. In Rus.
- Zaporozhets E.P. *Gidraty* [Hydrates]. Krasnodar, Yug Publ. House, 2017. 460 p.
- Zaporozhets E.P. *Regularnye processy i oborudovanie v tekhnologiyakh sbora, podgotovki i pererabotki* [Regular processes and equipment in the technology of collection, preparation and processing of oil and natural gases]. Krasnodar, Yug Publ. House, 2017. 620 p.
- Shagov V.Sh. To the theory of decomposition of metastable gas hydrate. *Theoretical foundations of chemical technology*, 2017, vol. 47, no. 4, pp. 454–463. In Rus.
- Derevich I.V. The hydrodynamics and heat transfer and mass transfer of particles under conditions of turbulent flow of gas suspension in a pipe and in an axisymmetric jet. *Journal of High Temperature*, 2016, vol. 40, no. 1, pp. 78–91.

17. Shirshova A.V. Growth and dissociation of gas hydrates in oil-water emulsions. *University News. Ser. Oil and gas*, 2017, no. 5, pp. 95–101. In Rus.
18. Gavriluk S.L., Saurel R. Mathematical and numerical modeling of two phase compressible flows with micro inertia. *Journal of Computational Physics*, 2016, vol. 175, Iss. 1, pp. 326–360.
19. Naseer M., Brandstatter W. Hydrate formation in natural gas pipelines. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2017, vol. 70, pp. 261–270.
20. Dmitriev V.V., Gandzha T.V., Dolganov I.M., Aksenova N.V. An algorithm to improve the speed and accuracy of analysis of chemical process systems operation. *Petroleum and Coal*, 2017, vol. 59, Iss. 3, pp. 429–441.
21. Volkov P.V. Experimentalnoe issledovanie aeromekhanicheskogo metoda dlya predotvrashcheniya gidratoobrazovaniya pri razrabotke gazovykh mestorozhdeniy i ustanovok kompleksnoy podgotovki gaza [An experimental study of the aeromechanical method to prevent hydrate formation during the development of gas fields and integrated gas treatment plants]. *Neft i gaz 2019. Sbornik trudov 73 mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [Proc. of the 73rd international youth scientific conference. Oil and Gas 2019]. Moscow, 2019, vol. 1, pp. 78–83.
22. Lovick J., Angeli P. Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil–water flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, vol. 30, pp. 139–157.

Received: 17 June 2020.

Information about the authors

Pavel N. Zytkov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Pavel V. Volkov, junior researcher, TomskNIPIneft; aspirant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artem V. Bolshunov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.272/275.34;504.05/06:622.34

БЕСЦЕМЕНТНЫЕ ЗАКЛАДОЧНЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ВОДРАСТВОРИМЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Хайрутдинов Марат Минизяетович¹,
profmarat@gmail.com

Конгар-Сюрюн Чейнеш Буяновна¹,
Cheynesh95@mail.ru

Тюляева Юлия Сергеевна¹,
tyulyaevayu@gmail.com

Хайрутдинов Альберт М¹,
khayrutdinov.albert99@gmail.com

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 4.

Актуальность исследования обусловлена увеличением воздействия деятельности горно-обогатительных и металлургических предприятий на экологию. Приоритетным направлением является создание и применение щадящих геотехнологий, снижающих уровень влияния горно-обогатительного производства на экосистему. С каждым годом происходит интенсификация образования отходов горного, обогатительного и металлургического производств, что приводит к увеличению объемов техногенных массивов. Данный факт предопределяет необходимость их утилизации. Использование техногенных отходов водорастворимых руд для замены специально добываемого инертного компонента при приготовлении закладочного композита, а замена цементного вяжущего на отходы магниевых и содовых производств или шлаки металлургических заводов, содержащих MgO, представляется хорошим способом их утилизации.

Цель работы: создание бесцементной закладочной смеси с улучшенными прочностными и заданными реологическими свойствами на основе активированных техногенных отходов водорастворимых руд при использовании в качестве вяжущего магниесодержащих шлаков металлургического завода, что позволит реализовать принцип безотходного производства.

Объект: закладочная смесь на основе активированных текущих галитовых отходов галургического способа обогащения ПАО «Уралкалий» (инертный наполнитель) и магниесодержащих шлаков Чусовского металлургического завода (вяжущее), с применением лингосульфата для улучшения связующей способности и в качестве регулятора реологических свойств.

Методология: применялись актуальные государственные стандарты и утвержденная методика исследований; испытания производились на тарированном и исправном оборудовании; активирование производилось в лабораторном дезинтеграторе DESI-11; образцы на сжатие тестировались на испытательном прессе ПИ-2000-А; реологические свойства закладочной смеси исследовались по осадке конуса «СтройЦНИЛа» и растекаемости на вискозиметре Суттарда; достоверность подтверждается повторяемостью результатов при достаточном количестве экспериментов.

Результаты. Обоснована допустимость замены цементного вяжущего на магниесодержащие отходы (шлаки Чусовского металлургического завода). Доказана возможность применения техногенных отходов водорастворимых руд для замены специально добываемого инертного компонента при приготовлении закладочного композита. Приведены результаты исследований замены специально добываемого инертного наполнителя техногенными отходами. Исследовано положительное влияние механической активационной обработки компонентов закладочной смеси на её реологические свойства и прочностные характеристики закладочного массива. Подтверждено применение лингосульфата в качестве добавки, позволяющей улучшить связующие и реологические свойства закладочной смеси.

Ключевые слова:

Безотходное производство, водорастворимые руды, геотехнология, закладка выработанного пространства, закладочная смесь, отходы горного производства, техногенные отходы, хвосты обогащения.

Введение

Из ранее проведенных исследований следует, что на российскую горнодобывающую отрасль приходится около 5 % мирового производства железной руды [1], порядка 25 % калийных руд, а всего Россия производит 9,5 % мировой продукции добываемого сырья [2]. Однако в отличие от большинства стран Европы и Японии, обеспечивающих высокий уровень экологической безопасности, Российская горная промышленность находится на достаточно низком уровне защиты окружающей среды, утилизации или переработки техногенных отходов горно-обогатительного и металлургического секторов и использования их в последующем производстве [2, 3]. С каждым годом содержание по-

лезного компонента в добываемой руде уменьшается, что приводит к большему образованию отходов после её переработки. Накопление техногенных отходов является одной из форм воздействия человека на экосистему, что ведёт к различным качественным или количественным изменениям её элементов [4].

При получении 1 т калийных удобрений образуется до 30 т водорастворимых хвостов обогащения, на удаление и хранение которых затрачивается в среднем от 5 до 8 % стоимости производимой продукции. Но если признать, что срок существования хвостохранилищ и отвалов неограничен, то мультипликативный ущерб от размещения и хранения техногенных отходов может превосходить ценность добытого

продукта. На сегодняшний день в циклическом производстве используется не более 10 % извлекаемых пород от вскрышных и проходческих работ и примерно 20 % водорастворимых техногенных отходов обогащения. По сведениям Министерства природных ресурсов и экологии к настоящему времени на территории России складировано более 45 млрд т отходов горно-обогатительного производства различного класса опасности. В России ежегодно увеличивается уровень загрязнения техногенными отходами. За последнее двадцать лет годовой объём прироста техногенных массивов пустыми породами от проходческих и вскрышных работ увеличился на 30 % и составляет 210 млн м³/год, а отходов обогатительных фабрик – 140 млн м³/год [5]. Все эти объёмы загрязняют окружающую среду, выводят из оборота плодородные земли, занимая тысячи гектар сельскохозяйственных угодий.

Применение техногенных отходов водорастворимых руд в закладочных композитах

Идея применения отходов обогатительного и металлургического переделов для замены инертного компонента при создании закладочного композита не является новой [3, 6–8]. Использование водорастворимых отходов, образующихся в результате обогащения, для создания композитных смесей позволит утилизировать техногенные отходы, что значительно снизит воздействие горного сектора на экосистему региона [9]. Из анализа мировой практики добычи полезного ископаемого следует, что 35 % горнодобывающих предприятий отдают предпочтение системам с искусственным поддержанием очистного пространства, а именно, системам с твердеющей закладкой [6]. Отработка месторождения геотехнологией с закладкой улучшает качественно-количественные показатели извлечения [10], увеличивает безопасность на участках производства горных работ, в частности и извлечения полезного ископаемого в целом [11], снижает риски возникновения техногенных аварий на предприятиях горнопромышленного сектора [6, 8]. Техногенные катастрофы на горных предприятиях: провалы; горные удары и техногенные землетрясения, зачастую сопровождаются сейсмической активностью и вибрационными колебаниями. Влияние вибрационных колебаний на подземные выработки и поверхностные сооружения широко обсуждались в ранее проведённых исследованиях [12–16].

При создании закладочного композита в качестве вяжущего используют цемент или его производные, а в качестве инертного компонента – специально добываемые материалы: песок, гравий, щебень. Техноген-

ные отходы горного и обогатительного производств широко используются на предприятиях горного сектора всего мира. Порядка 100 рудников Австралии, Ирландии, Канады, России, США, Финляндии, Швеции, Японии и других применяют техногенные отходы. При этом общегодовой объём извлечения ископаемых в этих странах составляет около 64 млн т. Доля использования техногенных отходов горного сектора для замены специально добываемого инертного компонента распределяется следующим образом: 67 % – отходы обогатительных фабрик, 25 % – пустая порода от вскрышных и проходческих работ, 7 % – пески и шлаки металлургического передела или ТЭЦ [17].

В отходах обогатительных фабрик и металлургических заводов, хотя и не в значительном количестве, остаются полезные компоненты, которые можно извлечь при повторной глубокой переработке (табл. 1). Зачастую в техногенных отходах горно-обогатительного и металлургического секторов имеются вредные примеси. Всё это существенно ограничивает возможность применения техногенных отходов в циклическом производстве. Идея применения техногенных отходов водорастворимых руд при приготовлении композитного материала, используемого для закладки выработанного пространства, не является новой [18–23]. Ранее проводимые исследования активационной обработки техногенных отходов обогатительных фабрик полиметаллических руд показали положительные результаты [7, 8, 17, 24]. Но применение в качестве инертного компонента водорастворимых техногенных отходов обогатительных фабрик производилось без дополнительной активационной переработки.

Кроме того, смеси, используемые для закладочных работ при извлечении минерального сырья, отличаются от смесей, растворов и бетонов, предназначенных для гражданского строительства, увеличенным количеством воды. Повышенное отношение воды к твёрдой составляющей в закладочных композитах необходимо для улучшения её транспортной способности до места укладки и растекаемости в закладываемой камере. Увеличенное содержание воды приводит к снижению прочностных характеристик создаваемого искусственного массива [24].

В связи с этим целью настоящего исследования являлось создание композитного материала на основе водорастворимых техногенных отходов металлургического способа обогащения с заданными реологическими свойствами и предназначенного для формирования искусственного массива с повышенными прочностными характеристиками.

Таблица 1. Химический состав техногенных отходов обогащения водорастворимых руд

Table 1. Chemical composition of manmade enrichment waste of water-soluble ore

Отходы обогащения Enrichment waste		Компоненты Components	KCl	NaCl	MgCl ₂	CaSO ₄	Нерастворимый остаток Insoluble residue	Br ⁻	H ₂ O _{крст.} H ₂ O _{cryst.}
Галургические Halurgic	Лежалые/Stale	Массовая доля, % Weight ratio, %	3,35	92,66	0,07	1,91	1,9	0,03	0,08
	Текущие/Current		1,91	94,3	0,07	1,914	1,7	0,026	0,08
Флотационные Flotation	Лежалые/Stale	Массовая доля, % Weight ratio, %	9,96	82,64	1,1	4,488	1,7	0,032	0,08
	Текущие/Current		4,88	87,78	1,1	4,331	1,8	0,029	0,08

В качестве инертного компонента применяются техногенные водорастворимые отходы обогатительной фабрики, прошедшие дополнительную активаци-

онную обработку. Химический и гранулометрический составы отходов обогатительной фабрики водорастворимых руд приведены в табл. 1, 2.

Таблица 2. Гранулометрический состав техногенных отходов обогащения водорастворимых руд

Table 2. Granulometric composition of manmade enrichment waste of water-soluble ore

Отходы Waste	Крупность частиц, мм/Particle size, mm								Средняя крупность Average size
	+7	7...5	5...3	3...2	2...1	1...0,5	0,5...0,25	–0,25	
	7,4	7,3	17	16,3	20,9	19,5	8,6	3,0	2,54

Принимая во внимание ранее накопленный опыт в горнодобывающей индустрии, необходимо учесть, что при создании композита для закладки выработанного пространства на основе техногенных отходов водорастворимых руд в качестве вяжущих используются следующие материалы: цемент, известь, доменные гранулированные шлаки металлургического передела, золошлаковые отходы ТЭЦ и ГРЭС, добавки из гипса и хлористого кальция. Помимо этого, фундаментальным материалом для приготовления твердеющего закладочного композита могут служить: бишофит, магнезиальный цемент, каустический магнезит, керамзит.

Научно-исследовательские работы, проведенные ранее в области создания твердеющих закладочных смесей на основе отходов водорастворимых руд, продемонстрировали преимущество магнезиальных вяжущих [9, 22].

Создание искусственного массива на основе техногенных отходов водорастворимых руд

Ранее проведенными исследованиями установлено, что в качестве затворителя наиболее эффективно использовать солевые растворы ввиду того, что скорость твердения и прочностные характеристики массива резко увеличиваются [17–19]. Дополнительным преимуществом магнезиального вяжущего является его способность в малых количествах образовывать достаточно прочные связи для большой массы инертного заполнителя, в данном случае техногенных отходов водорастворимых руд [18–20]. Для промышленного производства в качестве вяжущего не обязательно использовать специально приготовленный магнезиальный цемент или каустический магнезит. Для уменьшения себестоимости закладочных работ можно использовать отходы магнезиевого и содового производств или магнезийсодержащие шлаки металлургических заводов, что представляет особый интерес, учитывая значительные объемы закладочных работ [18, 22].

Пониженную способность омоноличивания можно компенсировать применением цемента или активирующей добавки. При проведении экспериментов в данной работе применялись магнезийсодержащие шлаки Чусовского металлургического завода.

Все эксперименты выполнялись в соответствии с методическими указаниями и инструкцией по контролю качества закладочных смесей [25].

Магнезиальные шлаки и техногенные отходы обогащения водорастворимых руд в закладочную смесь добавлялись в пропорции 25 и 51 % от общего объема

соответственно. При этом производилась раздельная активация компонентов в дезинтеграторе DESI-11 путём измельчения до содержания класса менее 0,071 мм не менее 68–72 и 88–92 % каждого компонента соответственно.

Подвижность, расслаиваемость и растекаемость закладочного композита исследовали по стандартной методике «СтройЦНИЛа» по глубине осадки конуса и на вискозиметре Суттарда.

Затвердевание образцов происходило в условиях, предусмотренных методикой ($T=20\pm 2$ °C; $W=95\pm 5$ %), их испытание на сжатие производили через заданные сроки, предусмотренные методикой: 7; 28; 60 и 90 суток [25].

Испытания первого состава показали неудовлетворительные результаты, что выразилось в низких прочностных характеристиках образцов и малой подвижности композита (состав № 1 в табл. 3).

С целью увеличить гидравлическую активность магнезиальный шлак обрабатывали до крупности не менее 88–92 % класса менее 0,071 мм. Крупность отходов обогащения водорастворимых руд оставляли без изменения. При испытании образцов на одноосное сжатие было замечено увеличение показателей. Но при этом необходимо констатировать, что реологические свойства закладочной смеси не удовлетворяли показателям транспортабельности к месту укладки (состав № 2 в табл. 3).

Для улучшения реологических свойств и увеличения растекаемости закладочной смеси попытались снизить долю фракции менее 0,071 мм в техногенных отходах обогащения водорастворимых руд. Данный эксперимент привёл к падению прочности образцов при испытании на одноосное сжатие (состав № 3 в табл. 3).

Увеличение водотвёрдого отношения для улучшения реологических свойств является нецелесообразным ввиду резкого падения прочностных характеристик закладочного массива и наращивания объёмов водоотлива.

Ранее проведенные исследования показали перспективность применения химических добавок при создании материалов с более прочными структурными связями [26], что позволяет увеличить прочностные характеристики создаваемого искусственного массива [17, 22]. К активирующим добавкам, способным не только повысить прочностные характеристики закладочного массива, но и увеличить транспортабельность закладочной смеси, относится лингосульфат [18, 27], полученный путем переработки отработанных сульфитных и бисульфитных щелоков.

Таблица 3. Результаты испытаний закладочных смесей

Table 3. Test results of backfill mixtures

№ п/п No	Компоненты закладочной смеси Backfill mixture components						Растекание, мм Flowability, mm	Осадка конуса, см Slump compression, cm	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа Ultimate uniaxial compression strength, MPa					
	Магнезиальный шлак Magnesian slags		Отходы обогащения водорастворимых руд Enrichment waste of water-soluble ores		Лингосульфат, % от твёрдого Lingosulfate, % of solid	Вода, масс. % Water, wt. %			Продолжительность твердения, сутки Duration of mixture hardening, days					
	масс. % wt. %	Содержание фракции менее 0,071 мм Fraction content less than 0,071 mm	масс. % wt. %	Содержание фракции менее 0,071 мм, % Fraction content less than 0,071 mm, %					7	28	60	90		
1	25,0	68–72	51,0	88–92	–	24,0	105	10	0,2	1,5	1,9	2,2		
2	25,0	88–92	51,0	88–92	–	24,0	95	10	0,15	1,6	2,2	2,5		
3	25,0	88–92	51,0	68–72	–	24,0	120	14	0,1	1,2	1,7	1,8		
4	25,0	88–92	51,0	88–92	1	23,25	165	16	0,25	2,0	2,75	3,1		

Применение лингосульфата позволило получить закладочный массив с повышенной прочностью при реологических характеристиках, удовлетворяющих требованиям транспортабельности (№ 4 в табл. 2).

При создании искусственного массива на основе техногенных отходов необходимо учитывать длительное влияние компонентов закладки на омоноличенный массив и достаточно строго подходить к их применению. Все процессы, способные возникнуть в искусственном массиве после затвердевания закладочной смеси, практически невозможно предугадать и смоделировать. Достаточно полно и всецело методы и способы контроля омоноличенного массива рассмотрены в работах [28, 29].

Применение техногенных отходов при приготовлении композитного материала, предназначенного для поддержания очистного пространства, без дополнительной переработки противоречит экономической целесообразности и экологической безопасности. Разработаны технологии извлечения полезных компонентов из техногенных отходов [30].

С развитием науки, техники и технологии улучшаются качественные показатели обогащения, что подтверждает анализ химического состава хвостов обогащения, взятых с хвостохранилищ (до 2000 г. формирования) и непосредственно с производственной линии обогащения (табл. 1) на предприятии ПАО «Уралкалий».

Следовательно, для закладочных работ без дополнительной переработки можно использовать текущие хвосты галургического способа обогащения. При использовании лежалых хвостов галургического способа обогащения и хвостов флотационного способа обогащения необходимо произвести их дополнительное обогащение. Дополнительное обогащение можно производить на мощностях обогатительной фабрики, освободившихся в результате уменьшения объёмов добычи предприятия ввиду выхода из эксплуатации БКРП-1 «Уралкалий».

Заключение

Применение бесцементной технологии для создания искусственного массива на основе водорастворимых техногенных отходов позволяет разработать закладочный массив с необходимыми прочностными характеристиками. Применение отходов горного и промышленного производства для создания композитного материала ведёт к их утилизации, исключает применение специально добываемого сырья для компонентов смеси, что приводит к снижению расходов на закладочные работы, а как следствие уменьшает стоимость добываемой руды. Разработка закладочной смеси из техногенных отходов создаёт возможность реализовать принцип организации горного производства, предусматривающий применение промежуточных продуктов в цикличном производстве и исключаящий образование техногенных отходов водорастворимых руд.

Образование и складирование техногенных отходов водорастворимых руд создаёт глобальную экологическую проблему, влекущую изменение ландшафтов в районах горного производства и ухудшение состояния окружающей среды. Создание безотходного горного производства с применением промежуточных продуктов в цикличном производстве позволяет сохранить экологию региона. Применение техногенных отходов водорастворимых руд в цикличном производстве приведёт в последствии к мультипликационному экономическому эффекту, определяемому суммой величин предотвращаемого экологического ущерба, затрат на складирование и хранение, расходов на утилизацию и экологические отчисления.

Использование техногенных отходов водорастворимых руд не будет иметь положительный экономический эффект без их повторной переработки и производства продукции. При этом вовлечение в переработку техногенных отходов водорастворимых руд создаёт предпосылки создания новой материально-сырьевой базы горнопромышленного комплекса и исключает расходы на разведку и освоение новых месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарина В.П. Горнодобывающая промышленность России на мировом рынке: Современные тенденции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 3. – С. 209–216.
2. Пучков Л.А. Россия в горнодобывающем мире // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 5. – С. 5–10.
3. Использование хвостов обогащения руд в твердеющих смесях / В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, Р.Н. Максимов, Ю.М. Ляшенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № S25. – С. 18–27.
4. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities / A.L. Ivannikov, Ch. Kongar-Syuryun, J. Rybak, Y. Tyulyaeva // World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMES 2019). – Prague: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. – V. 362. – 012130. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012130.
5. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья // Горный журнал. – 2008. – № 6. – С. 71–74.
6. Влияние хвостохранилищ на окружающую среду горнодобывающего региона / В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, В.С. Сергеев, В.В. Вернигор // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. – № 6. – С. 44–48.
7. Использование хвостов обогащения в приготовлении твердеющих закладочных смесей / В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, Ч. Чан, С.А. Масленников // Известия Уральского государственного горного университета. – 2018. – № 2 (50). – С. 95–101. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-2-95-101.
8. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Масленников С.А. Охрана природной геологической среды утилизацией хвостов обогащения руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 6–15.
9. Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction / Ch. Kongar-Syuryun, Y. Tyulyaeva, A. Khairutdinov, T. Kowalik // Construction the Formation of Living Environment (FORM-2020). – Hanoi: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. – V. 869. – 032004. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032004.
10. Технологические схемы отработки камерами с расширением и закладкой выработанных пространств / В.И. Сарычев, В.В. Мельник, М.А. Голодов, И.Н. Зубаков, С.С. Жуков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2011. – № 2. – С. 203–206.
11. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. Повышение безопасности труда увеличением области применения твердеющих смесей из отходов переработки // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 8. – С. 51–54.
12. The surface wave attenuation as the effect of vibratory compaction of building embankments / A. Herbut, M.M. Khairutdinov, C. Kongar-Syuryun, J. Rybak // World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMES 2019). – Prague: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. – V. 362. – 012131. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012131.
13. Dobrzycki P., Kongar-Syuryun Ch., Khairutdinov A. Vibration reduction techniques for Rapid Impulse Compaction (RIC) // Modelling and Methods of Structural Analysis. – Moscow: IOP Conference Series: Journal of Physics, 2019. – V. 1425. – 012202. DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012202.
14. Herbut A., Rybak J., Brzakała W. On a sensor placement methodology for monitoring the vibrations of horizontally excited ground // Sensors. – 2020. – V. 20 (7). – 1938. DOI: 10.3390/s20071938.
15. Wyjadłowski M. Methodology of dynamic monitoring of structures in the vicinity of hydrotechnical works – selected case studies // Studia Geotechnica et Mechanica. – 2017. – V. 39. – № 4. – P. 121–129. DOI: 10.1515/sgem-2017-0042.
16. Herbut A., Rybak J. Guidelines and recommendations for vibration control in the case of rapid impulse compaction // Advances and trends in engineering sciences and technologies II. – High Tatras: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. – P. 761–766. DOI: 10.1201/9781315393827-129.
17. Ермолович Е.А. Бесцементная закладочная смесь на основе техногенных отходов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2010. – № 9 (80). – С. 156–158.
18. Вотяков М.В. Повышение полноты извлечения запасов калийных руд на основе закладки выработанного пространства галитовых отходов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 89 с.
19. Гаркушин П.К. Исследование и выбор составов твердеющей закладки для калийных рудников Прикарпатья: дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1972. – 179 с.
20. Кравченко Ю.Г. Разработка составов твердеющих закладочных смесей из отходов переработки руд калийных предприятий: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1985. – 122 с.
21. Pengqiang Sh., Xianxiao X., Boyun L. Discussion on the main potash-concentrated districts and the resource potential in China // Geology of Chemical Minerals. – 2011. – V. 33. – № 1. – P. 1–8.
22. Хайрутдинов М.М., Вотяков М.В. Выбор химических добавок для твердеющей закладки на калийных рудниках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 6. – С. 218–221.
23. Selected black-coal mine waste dumps in the Ostrava Karviná region: an analysis of their potential use / D. Niemiec, M. Duraj, X. Cheng, M. Marschalko, J. Kubáček // World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMES 2017). – Prague: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. – V. 95. – 042061. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042061.
24. Ермолович Е.А., Ермолович О.В. Исследования реологических характеристик закладочной гидросмеси отходов обогащения железистых кварцитов ОАО «Комбинат КМАРУДА» // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 9 (206). – С. 143–146.
25. Методические рекомендации по контролю качества закладочных смесей / под ред. Н.Н. Мельников. – М.: Горный институт Кольского научного центра РАН, 1990. – 94 с.
26. Brzakała W. Strength modelling of geomaterials with random systems of structural joints // Probabilistic Engineering Mechanics. – 2011. – V. 26. – № 2. – P. 321–330.
27. Вотяков М.В. Формирование высокопрочного закладочного массива при использовании в качестве активатора лигносульфоната // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 10. – С. 199–203.
28. Gorska K., Muszyński Z., Rybak J. Displacement monitoring and sensitivity analysis in the observational method // Studia Geotechnica et Mechanica. – 2013. – V. 35. – № 3. – P. 25–43.
29. Bauer J., Pula W., Wyjadłowski M. Effect of partial mining of shaft protection pillar in terms of reliability index // Georisk. – 2015. – V. 9. – № 4. – P. 242–249.
30. Механохимическая технология добычи металлов из хвостов обогащения / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, В.С. Бригида, О.Г. Бурдзиева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 175–183.

Поступила 22.09.2020 г.

Информация об авторах

Хайрутдинов М.М., кандидат технических наук, доцент кафедры геотехнологии Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Конгар-Сюрюн Ч.Б., студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Тюляева Ю.С., студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Хайрутдинов А., студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

UDC 622.272/275.34:504.05/06:622.34

CEMENTLESS BACKFILL MIXTURES BASED ON WATER-SOLUBLE MANMADE WASTE**Marat M. Khayrutdinov¹,**
profmarat@gmail.com**Cheyne B. Kongar-Syuryun¹,**
Cheyne95@mail.ru**Yulia S. Tyulyaeva¹,**
tyulyaevayu@gmail.com**Albert M. Khayrutdinov¹,**
khayrutdinov.albert99@gmail.com¹ National University of Science and Technology MISIS,
4, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russia.

The relevance of the research is caused by the increasing impact of mining processing and metallurgical enterprises on the environment. The priority area is the creation and application of sparing geotechnologies that reduce the level of impact of mining and processing production on the ecosystem. The intensification of waste generation from mining, processing and metallurgical industries occurs every year. This leads to an increase in formation of manmade mass. This fact determines the need for their disposal. A good way of disposal is the use of manmade waste of water-soluble ores as an inert filler for preparing a backfill mixture, and to replace the cement binder with magnesium and soda production waste or metallurgical plant slags containing MgO.

The main aim of the research is to create a cementless backfill mixture with improved strength and specified rheological properties based on activated manmade waste of water-soluble ores when using magnesium-containing slags of a metallurgical plant as a binder. This will allow implementing the principle of non-waste production.

Object: backfill mixture based on activated current halite waste of the galurgic enrichment method of PJSC «Uralkali» (inert aggregate) and magnesium-containing slags of the Chusovsky metallurgical plant (binder), using lingsulfonate to improve the binding capacity and as a regulator of rheological properties.

Methodology: the current State standards and approved research methods were applied; tests were performed on calibrated and serviceable equipment; activation was carried out in a laboratory disintegrator DESI-11, samples for compression were tested on a test press PI-2000-A; the rheological properties of the backfill mixture were studied by the slump compression «StroyTSNIL» and by the flowability on a Suttard viscometer; reliability is confirmed by the repeatability of results with a sufficient number of experiments.

Results. The permissibility of replacing the cement binder with magnesium-containing waste (slags of the Chusovsky metallurgical plant) is proved. The possibility of using manmade waste of water-soluble ores to replace a specially extracted inert component in the preparation of a backfill mixture was proved. The results of the research on replacing a specially mined inert filler with technogenic waste are presented. The positive effect of mechanical activation treatment of the backfill mixture components on its rheological properties and strength characteristics of the fill mass was investigated. The use of lingsulfonate was confirmed as an additive that improves the binding and rheological properties of the backfill mixture.

Key words:

Non-waste production, water-soluble ores, geotechnology, backfill of mined-out void, backfill mixture, mining waste, manmade waste, enrichment tails.

REFERENCES

1. Samarina V.P. Mineral resource industry of Russia in the world market: current developments. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2017, no. 3, pp. 209–216. In Rus.
2. Puchkov L.A. Rossiya v gorno-dobyvayushchem mire [Russia in the mining world]. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2005, no. 5, pp. 5–10.
3. Golik V.I., Dmytrak Yu.V., Maksimov R.N., Lyashenko Yu.M. The use of tailings of the ores in hardening mixtures. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2018, no. S25, pp. 18–27. In Rus.
4. Ivannikov A.L., Kongar-Syuryun Ch., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities. *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2019)*. Prague, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 362, 012130. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012130.
5. Chanturiya V.A., Vigdergauz V.E. Innovative technologies for processing of man-caused mineral raw materials. *Gornyi Zhurnal*, 2008, no. 6, pp. 71–74. In Rus.
6. Golik V., Dmytrak Y., Sergeev V., Vernigor V. Impact of tailing dumps on the environment of the mining region. *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 6, pp. 44–48. In Rus.
7. Golik V.I., Dmytrak Y.V., Chan Ch., Maslennikov S.A. The use of tailings while preparing hardening filling mixtures. *News of the Ural State Mining University*, 2018, no. 2 (50), pp. 95–101. In Rus. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-2-95-101.
8. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A. Protection of natural geological environment by utilizing ore tailings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 6–15. In Rus.
9. Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A., Kowalik T. Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction. *Construction the Formation of Living Environment (FORM-2020)*. Hanoi, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. Vol. 869, 032004, DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032004.
10. Sarychev V.I., Melnik V.V., Golodov M.A., Zubakov I.N., Zhukov S.S. Technological schemes of mining by cells with widening and backfilling open areas. *Izvestiya tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, 2011, no. 2, pp. 203–206. In Rus.
11. Golik V.I., Burdzheva O.G. Increase of work safety by enlargement of field of application of hardening mixtures from processing waste. *Occupational Safety in Industry*, 2016, no. 8, pp. 45–50. In Rus.

12. Herbut A., Khairutdinov M.M., Kongar-Syuryun C., Rybak J. The surface wave attenuation as the effect of vibratory compaction of building embankments. *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2019)*. Prague, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 362, 012131. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012131.
13. Dobrzycki P., Kongar-Syuryun Ch., Khairutdinov A. Vibration reduction techniques for Rapid Impulse Compaction (RIC). *Modelling and Methods of Structural Analysis*. Moscow, Journal of Physics: Conference Series, 2019, vol. 1425, 012202. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012202.
14. Herbut A., Rybak J., Brząkała W. On a sensor placement methodology for monitoring the vibrations of horizontally excited ground. *Sensors*, 2020, no. 20 (7), 1938. DOI: 10.3390/s20071938.
15. Wyjadłowski M. Methodology of dynamic monitoring of structures in the vicinity of hydrotechnical works – selected case studies. *Studia. Geotechnica et Mechanica*, 2017, vol. 39, no. 4, pp. 121–129. DOI: 10.1515/sgem-2017-0042.
16. Herbut A., Rybak J. Guidelines and recommendations for vibration control in the case of rapid impulse compaction. *Advances and trends in engineering sciences and technologies II*. High Tatra, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. pp. 761–766. DOI: 10.1201/9781315393827-129.
17. Ermolovich E.A. Cementless filling mix based on technological waste. *Belgorod State University Scientific Bulletin: Natural Sciences*, 2010, no. 9 (80), pp. 156–158. In Rus.
18. Votyakov M.V. *Povyshenie polnoty izvlecheniya zapasov kaliinykh rud na osnove zakladki vyrabotannogo prostranstva galitovykh otkhodov*. Dis. Kand. nauk [Increasing the completeness of the extraction of potash ore reserves based on the backfilling of the mined-out space of halite waste. Cand. Diss.]. Moscow, 2009. 89 p.
19. Garkushin P.K. *Issledovanie i vybor sostavov tverdeyushchey zakladki dlya kaliinykh rudnikov Prikarpat'ya*. Diss. Kand. nauk [Research and selection of compositions of hardening backfill for potash mines of the Carpathian region. Cand. Diss.]. Leningrad, 1972. 179 p.
20. Kravchenko Yu.G. *Razrabotka sostavov tverdeyushchikh zakladochnykh smesei iz otkhodov pererabotki rud kaliinykh predpriyatii*. Dis. Kand. nauk [Development of compositions of hardening filling mixtures from ore processing waste from potash enterprises. Cand. Diss.]. Perm, 1985. 122 p.
21. Pengqiang Sh., Xianxiao X., Boyun L. Discussion on the main potash-concentrated districts and the resource potential in China. *Geology of Chemical Minerals*, 2011, vol. 33, no. 1, pp. 1–8.
22. Khairutdinov M.M., Votyakov M.V. Vybora khimicheskikh do-bavok dlya tverdeyushchey zakladki na kaliinykh rudnikakh [Choice of chemical additives for cemented backfill in potash mines]. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2007, no. 6, pp. 218–221.
23. Niemiec D., Duraj M., Cheng X., Marschalko M., Kubáč J. Selected black-coal mine waste dumps in the Ostrava Karviná region: an analysis of their potential use. *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2017)*. Prague, IOP Conference Series: Earth Environmental Science, 2017. Vol. 95, 042061. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042061.
24. Ermolovich E.A., Ermolovich O.V. The study of rheological characteristics of stowing hydromix of «Combinat KMARUDA» ferruginous quartzites tailings. *Belgorod State University Scientific Bulletin: Natural Sciences*, 2015, no. 9 (206), pp. 143–146. In Rus.
25. *Metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu kachestva zakladochnykh smesei* [Methodical recommendations for quality control of backfill mixtures]. Ed. by N.N. Melnikov. Apatity, Mining Institute of Science of the Federal Research Center «Kola Science Center» (MI KSC RAS), 1990. 94 p.
26. Brząkała W. Strength modelling of geomaterials with random systems of structural joints. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 321–330.
27. Votyakov M.V. Formirovanie vysokoprochnogo zakladochnogo massiva pri ispolzovanii v kachestve aktivatora lignosulfonata [Formation of a high-strength fill mass when using lignosulfonate as an activator]. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2008, no. 10, pp. 199–203.
28. Gorska K., Muszyński Z., Rybak J. Displacement monitoring and sensitivity analysis in the observational method. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2013, vol. 35, no. 3, pp. 25–43.
29. Bauer J., Pula W., Wyjadłowski M. Effect of partial mining of shaft protection pillar in terms of reliability index. *Georisk*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 242–249.
30. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Brigida V.S., Burdzieva O.G. Mechanochemical technology of metal mining from enriching tails. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 6, pp. 175–183. In Rus.

Received: 22 September 2020.

Information about the authors

Marat M. Khayrutdinov, Cand. Sc., National University of Science and Technology MISiS.

Cheynesh B. Kongar-Syuryun, student, National University of Science and Technology MISiS.

Yulia S. Tyulyaeva, student, National University of Science and Technology MISiS.

Albert M. Khayrutdinov, student, National University of Science and Technology MISiS.

УДК 621.184.2-192

СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ АТОМОВ – НАНОМАСШТАБНЫЙ ИНДИКАТОР СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Заворин Александр Сергеевич¹,
zavorin@tpu.ru

Любимова Людмила Леонидовна¹,
lll@tpu.ru

Буваков Константин Владимирович¹,
kvb@tpu.ru

Фисенко Роман Николаевич¹,
ronifis@tpu.ru

Ташлыков Александр Анатольевич¹,
tashlykov@tpu.ru

Артамонцев Александр Иванович¹,
a_art@tpu.ru

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

Актуальность исследования связана с повышением надежности сварных соединений паросиловых установок и тем самым с рациональным использованием материалов изделий за счет совершенствования и развития методов изучения их ресурсных физических характеристик.

Цель: тестирование новых наномасштабных структурных характеристик III рода для оценок состояния поверхности.

Объект: образцы жаропрочной стали трубных поверхностей нагрева паровых котлов.

Методы: физическое моделирование условий эксплуатации путем термоциклирования в электропечи МИМП-10УЭ, холодно-го циклического деформирования с применением гидравлического пресса, рентгенометрия образцов с оценкой среднеквадратичных отклонений атомов и внутренних структурных напряжений на рентгеновских дифрактометрах типа ДРОН, анализ морфологии поверхности с помощью портативного электронного микроскопа типа PENSCKOPE с увеличением $\times 20$.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования, связанные с количественной оценкой колебательной амплитуды атомов и ее эволюцией при циклических термических и механических нагрузках. В результате исследований предложен новый диагностический параметр в виде колебательной амплитуды атомов \bar{U}^2 , отражающий фундаментальную природу сил межатомных связей. Продемонстрирована корреляция между среднеквадратичными отклонениями атомов (микромасштабный уровень свойств), представляющими микроструктурные характеристики III рода, с макромеханическими характеристиками $\sigma_{0,2}$ и σ_B (макромасштабный уровень свойств). Так как условный предел текучести и временное сопротивление разрушению связаны с прочностью и разрушением, то и среднеквадратичные отклонения атомов могут быть использованы в качестве индикатора поврежденности и признака достижения предельных состояний. Параметр \bar{U}^2 может служить также характеристикой текущего индивидуального физического состояния металла. Предложена новая методология оценки текущего и наступления предельных состояний. Показано, что восстановление структуры контролируется на атомном микромасштабном уровне по колебательной амплитуде и напряжениям I рода.

Ключевые слова:

Сталь, поверхность нагрева, механическое циклическое деформирование, термоциклирование, рентгеновская дифракция, среднеквадратичные отклонения, структурные напряжения I рода.

Введение

Разрушение труб котлов, сварных соединений и их околошовных зон – нередкое явление, и не всегда возможно предсказать момент наступления предельного состояния в условиях скрытого процесса накопления микроповрежденности [1–6 и др.].

Деградация структуры стали происходит постоянно под термическими и механическими нагрузками и начинается на самых ранних стадиях эксплуатации [7, 8], а также вследствие естественного процесса старения материала [9]. В результате наблюдаются внезапные разрушения конструкций за счет трещинообразования. Именно условия накопления, развития и

распространения трещин являются в настоящее время наименее диагностируемыми и изученными [1].

В основу приближенных инженерных методов оценки накопления поврежденности и сопротивления разрушению положен традиционный подход анализа идеализированных тел, лишь приближенно отражающих поведение реальных объектов [9, 10].

Одной из важнейших задач в этих условиях остается надежная диагностика, что является основным средством установления резерва работоспособности металла [11–18 и др.].

Это требует не только совершенствования традиционных методов контроля и поиска новых подходов,

но и введения иных критериев диагностики текущего физического состояния, а также признаков накопления поврежденности и достижения металлом предельных состояний.

Одним из таких подходов может быть оценка внутренней структурной поврежденности металла, основанная на исследовании свойств III рода. Свойства III рода изучаются на объектах, размеры которых малы по сравнению с размерами микроструктуры. К таким объектам кроме зерен, блоков мозаики в зернах, участков границ зерен и т. д. можно отнести колебательную амплитуду атомов кристаллических решеток (среднеквадратичные отклонения), имеющую фундаментальную физическую природу.

Среднеквадратичные отклонения атомов связаны с температурой Дебая θ , характеризующей прочность межатомных связей [17–21]. Прочность межатомных связей наряду со структурой металла и состоянием границ зерен является главным параметром, определяющим жаропрочность – одну из важнейших характеристик металла для энергомашиностроения. Развитие энергетики упирается в создание жаропрочных материалов. Жаропрочность металла возрастает с увеличением температуры плавления именно потому, что при этом растет прочность межатомных связей. Температура плавления, а также модуль упругости являются тепловой и силовой характеристиками прочности межатомных связей. Таким образом, физические, механические свойства металла, жаропрочность, ползучесть и разрушение пропорционально связаны с прочностью сил межатомных взаимодействий.

Известно, что все макроскопические гипотезы и их феноменологические обобщения не содержат параметров микроструктуры. Этот недостаток макроскопических критериев прочности является стимулом для изучения различных структурных критериев. Исследование сил межатомных взаимодействий и их связей с макромеханическими характеристиками прочности и разрушением в эксплуатационных условиях представляется перспективным направлением в диагностике и обеспечении ресурса работоспособности металла опасных производственных объектов.

Очевидно, что изучение субмикроскопических свойств III рода требует прецизионных физических методов.

Колебания атомов \bar{U}^2 в кристаллической решетке реального кристалла весьма сложны, однако на основании метода рентгеновской дифракции можно оценивать среднеквадратичные смещения атомов \bar{U}^2 при термическом или механическом деформировании [22, 23]:

$$\bar{U}^2 = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{d}{n} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{I}{I'} \right), \text{ \AA}^2, \quad (1)$$

где n – порядок отражения; d – межплоскостное расстояние, \AA; I' – интегральная интенсивность для деформированного образца, имп.; I – интегральная интенсивность для недеформированного образца (эталоны), имп.

Температура Дебая θ также может быть измерена экспериментально с применением метода рентгеновской дифракции [24]:

$$\theta = \sqrt{\frac{3h^2T}{k \cdot m \cdot \bar{U}^2}}, \text{ К}, \quad (2)$$

где \bar{U}^2 – среднеквадратичное смещение атомов, \AA²; h – постоянная Планка, Дж·с; k – постоянная Больцмана, Дж/К; m – масса атома, г; $T = 295 \text{ К}$ ($t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$).

Из (2) очевидно, что $\bar{U}^2 \sim 1/(m\theta^2)$. В то же время величина $(m\theta^2)$ характеризует прочность межатомной связи, поскольку она пропорциональна силе F , возвращающей атомы в положение равновесия: $F \sim m\theta^2$.

В рентгенометрии колебательная амплитуда атомов и температура Дебая связаны с уширением линий рентгеновских спектров и интегральной интенсивностью дифракционных рефлексов. Поэтому в качестве базового метода исследования выбран рентгенодифракционный метод, а целью исследования является тестирование новых наномасштабных структурных критериев для оценок состояния поверхности.

Подготовка образцов

Основными факторами старения металла труб парового тракта котлов являются температура и давление. Немаловажную роль в исчерпании работоспособности играют также и процессы естественного старения, связанные с распадом неустойчивых пересыщенных твердых растворов. Поэтому для экспериментальных исследований подбирались образцы с разной историей. Это были образцы труб, не бывших в эксплуатации, подвергнутые длительному естественному старению, а также образцы из труб, отработавших в реальных парогенераторах, полированные и неполированные образцы. Для других экспериментальных образцов индивидуальная история создавалась путем форсированного старения циклическим механическим деформированием, термоциклированием или совместным термо- и механоциклированием.

Исследованию подвергались следующие группы образцов.

1. Образцы № 1 и 2 из околошовной зоны сварного шва участка трубы из жаропрочной стали 12Х1МФ перлитного класса $\varnothing 38 \times 5$, находящейся в районе обмуровки котла в точке б (рис. 1). Труба эксплуатировалась в котле 16500 часов (≈ 2 года). Рабочая температура в точке б составляла $480 \text{ }^\circ\text{C}$. Образцы вырезаны на расстоянии 8 мм слева и справа от оси шва, размер плоскости образцов, повернутой к пучку рентгеновских лучей, составляет $10 \times 15 \text{ мм}$ (рис. 2). Диапазон циклических механических давлений для образцов № 1 и 2 составлял от 73 до 579 МПа с шагом 43–50 МПа.
2. Образцы № 3, 3', 4, 4' основного металла прямого участка той же трубы пароперегревателя (в районе точки б рис. 1). Образцы № 3' и 4' полировались. Образцы № 3 и 4 – не полированные.
3. Образцы № 5, 6, 7 и 10 стали марки 12Х1МФ, изготовленные из трубы $\varnothing 20 \times 2$, подвергались предварительному нагреву термическими циклами (термоциклированию). Каждый образец циклически нагревался и охлаждался до заданных температур 155 раз. Границы термоциклирования составляли:

- образец № 5 – 500–900 °С;
- образец № 6 – 100–500 °С;
- образец № 7 – 500–1000 °С;
- образец № 10 – 500–780 °С.

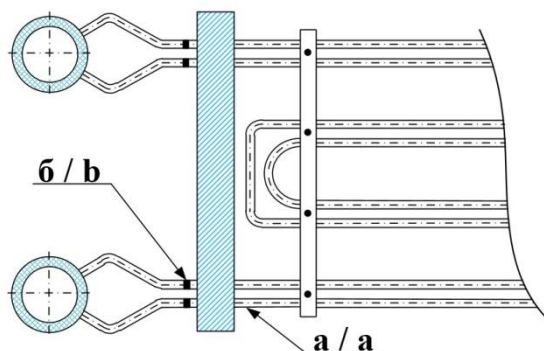


Рис. 1. Фрагмент схемы горизонтального пароперегревателя парового котла: а) место разрушения трубы; б) место сварного шва

Fig. 1. Fragment of the boiler horizontal superheater diagram: а) place of tube failure; б) place of weld seam

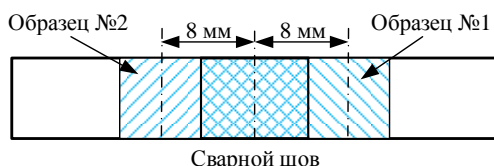


Рис. 2. Схема вырезки образцов

Fig. 2. Diagram of specimen cutout

- Образцы № 8 и 9 стали марки 12Х1МФ изготовлены из той же трубы, что и образцы № 5, 6, 7 и 10. Образцы № 8 и 9 не подвергались внешнему воздействию.
- Образцы № 11–15 стали марки 12Х1МФ из трубы $\varnothing 34 \times 4$ и длиной 600 мм. Образец № 11 вырезан из области трещины. Образец № 12 вырезан из зоны пластического течения. Образец № 13 вырезан из зоны, находящейся на прямом участке вдали от зоны раскрытия трубы. Образец № 14 вырезан из зоны, находящейся на противоположной стороне от зоны раскрытия трубы. Образец № 15 вырезан непосредственно из зоны сварного шва, находящегося далеко от зоны раскрытия трубы.
- Образец № 16 стали марки 12Х1МФ был подвержен механическому циклическому деформированию в пределах до 462 МПа (первый шаг составлял 68 МПа, остальные 23 значения давления выполнены с шагом порядка 17 МПа).
- Образцы № 17 и 18 стали марки 12Х1МФ, изготовленные из трубы $\varnothing 20 \times 3,5$, эксплуатировались в пароперегревателе в составе энергетического котла в пределах 25000–30000 часов при 560 °С. Образцы вырезаны из трубы выходного участка пароперегревателя четвертой ступени.

При вырезке не допускалось перегрева образцов: они вырезались и шлифовались медленно, при необходимости охлаждались струей воздуха, создаваемой компрессором.

Образец № 18 был выбран для испытания механическим циклическим деформированием. Шаги давления были следующими: 0 МПа; 125 МПа; 250 МПа; 370 МПа; 470 МПа; 500 МПа. После всех циклических нагрузок была проведена восстановительная термическая обработка (ВТО):

- нагрев до 1000 °С;
- выдержка 40 мин;
- охлаждение $> 5-8$ град/мин;
- отпуск 720 °С 1 час, скорость охлаждения после отпуска не лимитируется.

Химический состав стали 12Х1МФ: 0,08–0,15 С; 0,9–1,2 Cr; 0,25–0,35 Mo; 0,15–0,30 V; 0,4–0,7 Mn; 0,17–0,37 Si; $\leq 0,25$ Ni; $\leq 0,2$ Cu; $\leq 0,025$ S; $\leq 0,030$ P; остальное железо.

Методика эксперимента

Методика исследований включала испытания образцов после механического микродеформирования, термоциклирования, образцов, состаренных в естественных условиях, образцов после длительной эксплуатации, полированных образцов и образцов из зоны сварного шва и околошовной зоны.

Механическое циклическое деформирование

Механическому циклическому деформированию подвергались образцы № 1, 2, 16, 18.

Методика исследований циклическим механическим деформированием имитировала процессы механической усталости и заключалась в воспроизведении типичных для поверхностей нагрева процессов нагружения, создающих неоднородные внутренние напряжения. Это сводилось к циклическому деформированию образца на гидравлическом прессе с возрастающей нагрузкой в каждом очередном цикле нагружения (рис. 3). Время нагружения в каждом цикле составляло 15 с для всех образцов.

Термоциклирование

Термоциклированию подвергались образцы № 5, 6, 7 и 10, вырезанные из трубы после длительного (14 лет) естественного старения.

Каждый цикл включал «нагрев до максимальной температуры цикла – охлаждение до минимальной температуры цикла» (рис. 4). Охлаждение до минимальной температуры цикла производилось на воздухе. Для этого образец извлекался из печи. Минимальная температура цикла контролировалась пирометром. Каждый цикл «нагрев–охлаждение» выполнялся примерно в течение 2–3 мин. Циклы воспроизводились. Общее время термоциклирования каждого образца составляло порядка 5–6 часов (рис. 4).

Термоциклирование осуществлялось в среде атмосферного воздуха в лабораторной печи с автоматическим регулированием с максимальной температурой 1250 °С. В комплекте с печью использовались платиновые платиновые термопары. Совместно с термопарами работали приборы (потенциометры), входящие в комплект печи, с классом точности 1,5. Исправность работы термопары и приборов контролировалась мультиметром повышенной точности Sanwa PC500a.

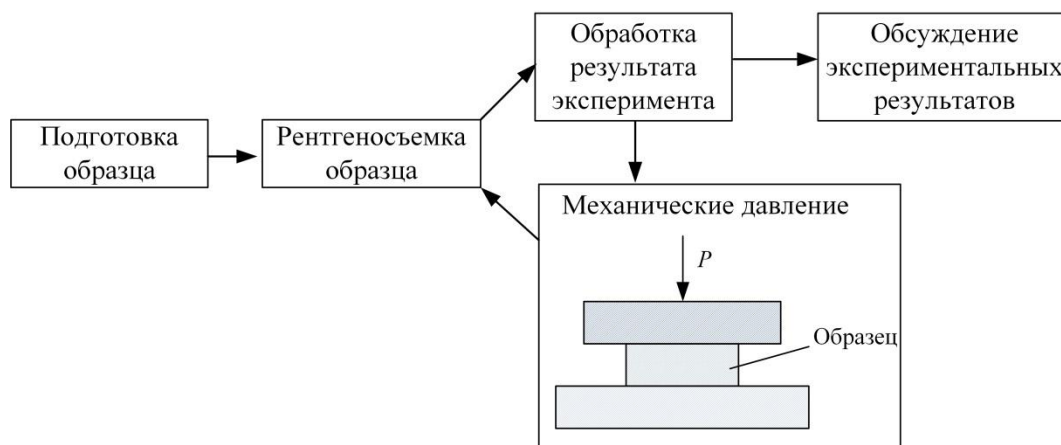


Рис. 3. Схема холодного циклического деформирования

Fig. 3. Diagram of cyclic cold deformation



Рис. 4. Схема термоциклирования (по вертикальной оси отложена произвольная температура цикла)

Fig. 4. Diagram of thermal cycling (the arbitrary cycle temperature is plotted along the vertical axis)

Рентгенометрические исследования

Рентгенометрические исследования выполнены на рентгеновском аппарате ДРОН (дифрактометр рентгеновский) с применением рентгеновской трубки с медным антикатодом при средней длине волны рентгеновского излучения $\lambda_{\text{CuK}\alpha_{\text{cp}}} = 1,54178 \text{ \AA}$. Излучение трубки монохроматизировано никелевым фильтром. Скорость вращения детектора в эксперименте равнялась 0,5 град/минуту, для повышения точности измерения углов дифракции сканирование производилось через 0,1 град. Экспозиция при измерении фона составляла 20 с.

Во всех экспериментах измеряемыми величинами являются: интегральная интенсивность дифракционных рефлексов, угол дифракции, период идентичности элементарных кристаллических ячеек, на основании которых устанавливаются все диагностические параметры.

Среднеквадратичные смещения атомов \bar{U}^2 рассчитывались по экспериментальным значениям интегральных интенсивностей дифракционных линий (110) образца и эталона на основании выражения (1) [22, 23]. Для этого в качестве образца-свидетеля применялся специально подготовленный идеально-мозаичный поликристаллический образец (эталон) из стали 12Х1МФ.

Характеристическая температура θ оценивалась на основании выражения (2).

Интегральная интенсивность дифракционных линий определялась как площадь под кривой профиля дифракционной линии (рис. 5).

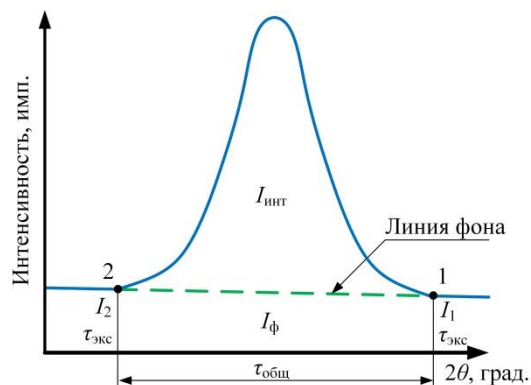


Рис. 5. Схема измерения интегральной интенсивности дифракционной линии

Fig. 5. Diagram of measurement of the diffraction line integrated intensity

Интегральная интенсивность рассчитывалась по выражению:

$$I_{\text{инт}} = I_{\Sigma} - I_{\Phi, \text{имп.}},$$

где I_{Σ} – суммарная интенсивность, включающая площадь под кривой профиля дифракционной линии и площадь фона, имп.; I_{Φ} – суммарная интенсивность фона, которая определяется по выражению:

$$I_{\Phi} = \frac{I_1 + I_2}{2 \cdot \tau_{\text{экс}}} \cdot \tau_{\text{общ}}, \text{ имп.},$$

где $\tau_{\text{экс}}$ – время набора импульсов в точках 1 и 2 (в работе 20 с); I_1, I_2 – интенсивность за время $\tau_{\text{экс}}$ в точках 1 и 2 (за 20 с); $\tau_{\text{общ}}$ – общее время набора импульсов от точки 1 до точки 2 (рис. 5), с.

Определение параметра элементарной кристаллической ячейки a производится из выражения:

$$a_i = d_i \sqrt{H_i^2 + K_i^2 + L_i^2}, \text{ \AA},$$

где d – межплоскостное расстояние, \AA ; H, K, L – индексы Миллера плоскости.

На основании угла дифракции θ по формуле Вульфа–Брэгга устанавливается межплоскостное расстояние d :

$$\lambda = 2d \cdot \sin \theta \rightarrow d = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta}, \text{ \AA},$$

где λ – длина волны (1,54178 \AA); θ – угол дифракции, град.

Определение зональных макронапряжений первого рода σ_I осуществляется на основании закона Гука по установленным значениям параметров элементарных кристаллических ячеек.

Для исходного образца без давления в качестве эталона выбран образец стали 12Х1МФ, отожженный при 1000 °С, $a_0 = 2,8731 \text{ \AA}$:

$$\sigma_I = \frac{a_i - a_0}{a_0} \cdot E, \text{ МПа}.$$

Для всех остальных образцов зональные напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_I = \frac{a_i - a_{i-1}}{a_{i-1}} \cdot E, \text{ МПа},$$

где a_i – текущий параметр элементарной ячейки, \AA ; a_{i-1} – предыдущий параметр элементарной ячейки, \AA ; E – модуль нормальной упругости для стали 12Х1МФ (213000 МПа).

Обсуждение экспериментальных результатов

Изменение \bar{U}^2 при холодном циклическом микродеформировании (образцы № 1 и 2)

На рис. 6, 7 представлены экспериментальные результаты, отражающие влияние циклических нагрузок на среднеквадратичные отклонения \bar{U}^2 в образцах № 1 и 2 из околошовной зоны сварного узла [25].

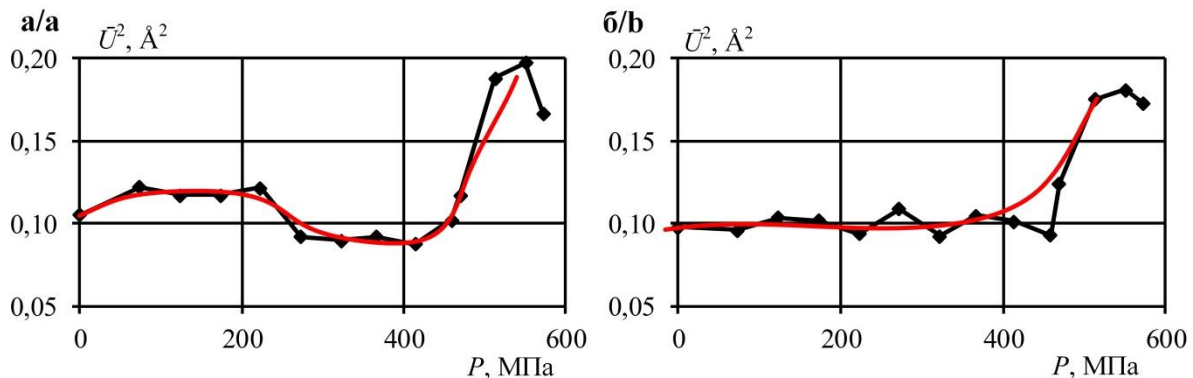


Рис. 6. Изменение среднеквадратичных отклонений атомов \bar{U}^2 при циклическом деформировании [25]: а) наружная сторона; б) внутренняя (образец № 1, рис. 2)

Fig. 6. Variation of RMSD \bar{U}^2 during cyclic deformation [25]: a) external side; b) internal side (Specimen No. 1, Fig. 2)

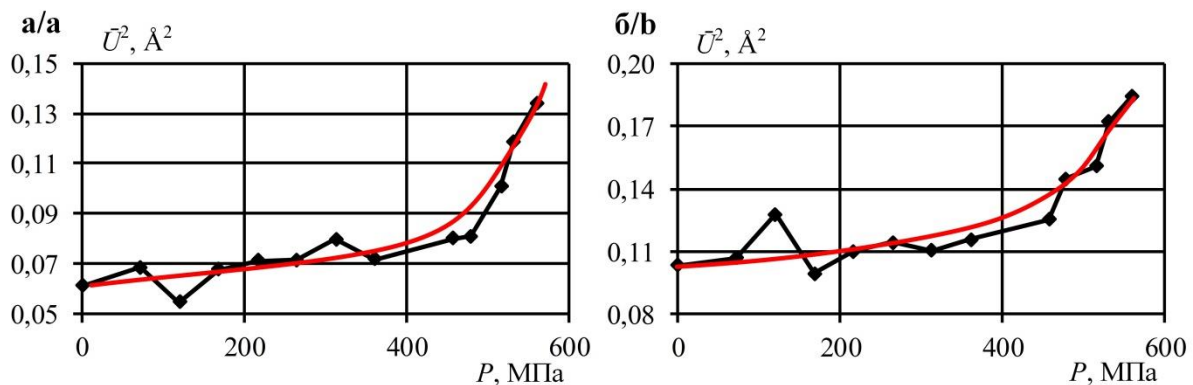


Рис. 7. Изменение среднеквадратичных отклонений атомов \bar{U}^2 при циклическом деформировании [25]: а) наружная сторона; б) внутренняя (образец № 2, рис. 2)

Fig. 7. Variation of RMSD \bar{U}^2 during cyclic deformation [25]: a) external side; b) internal side (Specimen No. 2, Fig. 2)

Для интерпретации полученных результатов (рис. 6, 7) принята модель колебаний атомов как связанных между собой маятников. Среднеквадратичные смещения \bar{U}^2 отражают коллективные колебательные свойства атомов вследствие наличия в твердом теле связанных состояний. Связанность маятников между собой определяет среднюю амплитуду колебаний \bar{U}^2 . Атомы, не связанные с другими, возникающие при разрывах межатомных связей, совершают свое независимое движение. Средняя колебательная амплитуда при этом возрастает. Изменение связанности атомов сопровождается эффектами изменения \bar{U}^2 и, соответственно, характеристической температуры.

Видно (рис. 6, 7), что \bar{U}^2 неоднородны для образцов № 1 и 2 как по разные стороны от оси сварного шва, так и для разных сторон одного и того же образца: на наружной стороне образца № 1 среднеквадратичные отклонения \bar{U}^2 изменяются от значений 0,11 до 0,09 \AA^2 в диапазоне внешних нагрузок до 400 МПа (рис. 6, а), при этом среднеквадратичные отклонения \bar{U}^2 на внутренней поверхности осциллируют от 0,095 до 0,11 \AA^2 (рис. 6, б). На наружной стороне образца № 2 среднеквадратичные отклонения \bar{U}^2 изменяются от значений 0,06 до 0,075 \AA^2 (рис. 7, а), а на внутренней поверхности от 0,115 до 0,125 \AA^2 (рис. 7, б).

Кроме того, среднеквадратичные отклонения \bar{U}^2 монотонно возрастают (рис. 6, 7), начиная с внешних давлений порядка 330–400 МПа, то есть при достижении предела текучести $\sigma_{0,2}$ (равного для стали 12Х1МФ $\sigma_{0,2}=330$ МПа при 20 °С [26]). Рост колебательной амплитуды свидетельствует об увеличении свободных несвязанных атомов, разрывах межатомных связей и накоплении точечных дефектов.

Максимум \bar{U}^2 наблюдается при внешнем давлении порядка 550 МПа (рис. 6, 7), которое соответствует пределу прочности σ_B ($\sigma_B=520$ МПа для стали 12Х1МФ при 20 °С [26]). У образца № 1 максимальные отклонения \bar{U}^2 при $P = \sigma_B$ составляют 0,2 и 0,18 \AA^2 для наружной и внутренней сторон соответственно (рис. 6). У образца № 2 максимальные отклонения при разрушающем напряжении равны 0,14 и 0,18 \AA^2 для наружной и внутренней сторон образца соответственно (рис. 7).

На рис. 8 представлен вид поверхностей образца № 1 после деформирования разрушающим давлением 550 МПа. На внутренней стороне образца наблюдаются следы коротких глубоких трещин, язв, питтинга и волн пластического течения материала (рис. 8, а). На наружной поверхности видны четкие следы хрупких продольных трещин (рис. 8, б).

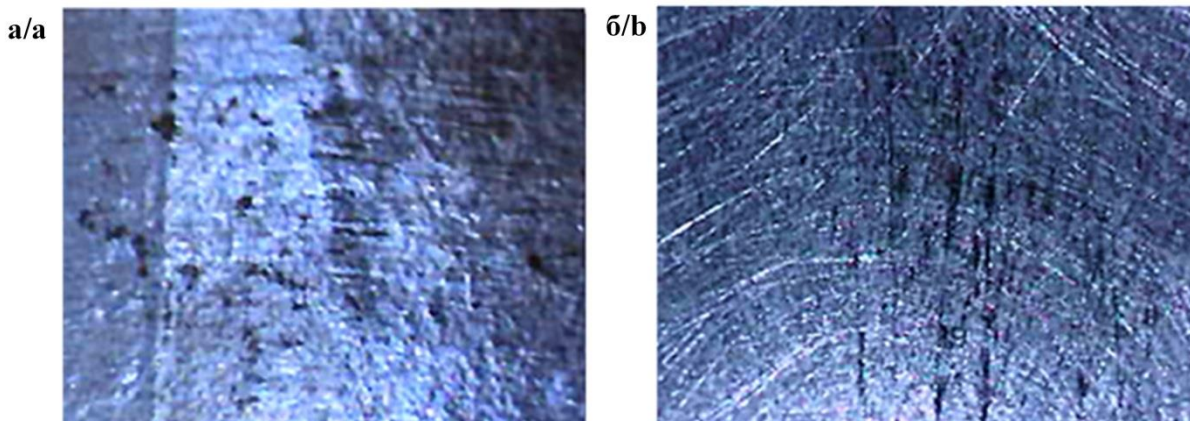


Рис. 8. Вид поверхностей образца № 1 после давления 550 МПа ($\times 20$): а) внутренняя сторона образца; б) наружная сторона образца

Fig. 8. Appearance of surfaces of Specimen No. 1 after 550 MPa pressure ($\times 20$): а) internal side of the specimen; б) external side of the specimen

Таким образом, результаты на рис. 6, 7 отражают связь среднеквадратичных отклонений (микромасштабный уровень свойств) с макромеханическими характеристиками $\sigma_{0,2}$ и σ_B (макромасштабный уровень свойств). Поскольку условный предел текучести и временное сопротивление разрушению связаны с прочностью и разрушением, то и среднеквадратичные отклонения атомов – один из критериев прочности межатомных связей, могут быть использованы в качестве критерия поврежденности и признака достижения предельных состояний. Параметр \bar{U}^2 может служить также характеристикой текущего индивидуального физического состояния металла.

Определение среднеквадратичных отклонений \bar{U}^2 полированных поверхностей

Полирование поверхности в значительной степени изменяет интегральную интенсивность дифракционных рефлексов, которая связана как с \bar{U}^2 , так и с θ .

Свойства поверхности, полученные полированием, представлены в табл. 1.

Результаты в табл. 1 показывают, что полирование поверхности образцов уменьшает величину \bar{U}^2 и, соответственно, увеличивает характеристическую температуру и силы межатомного взаимодействия, что можно связать с формированием при полировании аморфного слоя, обладающего повышенной прочностью, твердостью и упругостью по сравнению с кристаллическими материалами.

Таблица. Среднеквадратичные смещения \bar{U}^2 и характеристические температуры θ образцов основного металла из прямых участков трубы (по рис. 1). Сталь 12Х1МФ

Table. Root-mean-square deviations \bar{U}^2 and the Debye temperatures θ of parent metal specimens from the straight tube sections (in Fig. 1). 12Cr1MoV Steel

Исследуемый образец Specimen under study	$\bar{U}^2, \text{\AA}^2$	θ, K
№ 3 не полированный No. 3 unpolished	0,1336	477
№ 3' полированный No. 3' polished	0,1137	517
№ 4 не полированный No. 4 unpolished	0,0975	558
№ 4' полированный No. 4' polished	0,0827	606

Анализ образцов на различных стадиях истощения ресурса

Результаты, представленные на рис. 9, иллюстрируют, что образцы, имеющие разную историю происхождения и находящиеся на различных стадиях истощения ресурса, имеют существенно разные значения среднеквадратичных отклонений атомов \bar{U}^2 .

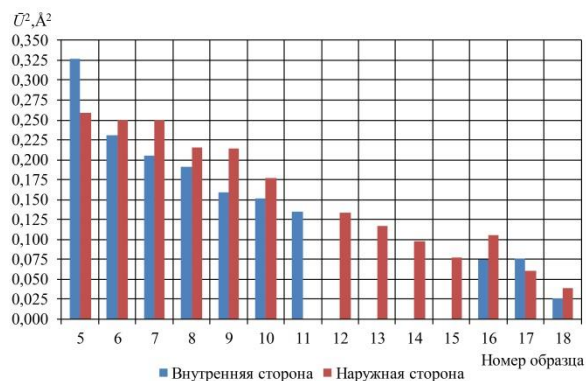


Рис. 9. Среднеквадратичные отклонения \bar{U}^2 образцов на различных стадиях истощения ресурса

Fig. 9. RMSD \bar{U}^2 of specimens at different life cycle stages

В целом для всех представленных образцов среднеквадратичные отклонения достаточно высоки. Наибольшие значения \bar{U}^2 наблюдаются у образцов, подвергнутых предварительному термоциклированию, – это образцы № 5, 6, 7 и 10, для которых \bar{U}^2 составляют 0,325, 0,25, 0,25 и 0,175 \AA^2 соответственно. Образцы № 8 и 9 из той же трубы также обладают высокими значениями \bar{U}^2 , но меньшими, чем у образцов № 5, 6 и 7 после термоциклирования. Образцы № 11–15 вырезаны из разных зон раскрытия трещины, имеют промежуточные значения \bar{U}^2 и, по-видимому, упрочнены за счет эффектов пластического течения металла в зоне раскрытия трещины. Образец № 16 подвергнут механическому циклическому деформированию до максимального давления 462 МПа. Среднеквадратичные отклонения для него, равные порядка 0,1 \AA^2 , примерно соответствуют значениям \bar{U}^2 для холоднодеформированных образцов № 1 и 2 при тех же давлениях (рис. 6, 7).

Наименьшими значениями \bar{U}^2 обладают образцы № 17 и 18.

На рис. 10 представлены экспериментальные значения внутренних макронапряжений I рода для образцов № 5–18. Распределение напряжений в образцах подтверждает базовую гипотезу, что прочность определяется разрушениями, связанными с разрывом межатомных связей и увеличением колебательной амплитуды атомов. Разрушения на всех его этапах сопровождаются релаксацией напряжений [27–29]. Видно, что внутренние напряжения для образцов № 5, 6 и 7, имеющих наибольшие значения \bar{U}^2 , находятся в сжимающей области деформаций. Переход в область сжатия возможен при полной разрядке напряжений (релаксации). Механизмом релаксации напряжений является образование микротрещин, то есть разрушение [27–29]. Образец № 10, также подвергнутый термоциклированию, как раз находится в стадии релаксации внутренних напряжений.

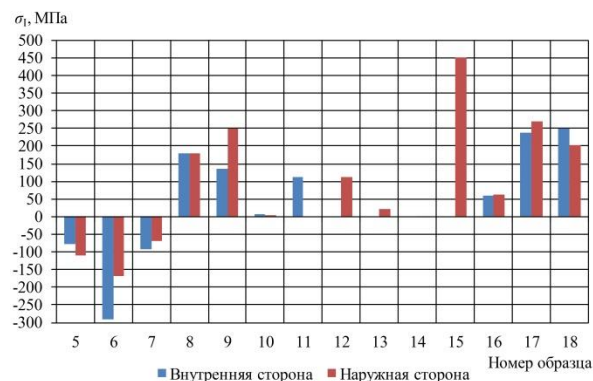


Рис. 10. Внутренние макронапряжения I рода для образцов на различных стадиях истощения ресурса

Fig. 10. First-kind internal macrostresses for specimens at different life cycle stages

Что же общего между графиками, изображенными на рис. 9 и 10?

Общей является сама физическая природа механизмов увеличения колебательной амплитуды атомов и релаксации внутренних напряжений, определяемая силами сцепления между атомами, ответственными за прочность и разрушение.

Все прочие образцы (рис. 10) обладают растягивающими напряжениями. Наибольшие растягивающие напряжения порядка 450 МПа наблюдаются у образца № 15, вырезанного непосредственно из зоны сварного шва, традиционно слабого места, имеющего высокие сварочные остаточные напряжения, приводящие к разрушению.

Дальнейшие исследования сводились к тому, чтобы образец № 18 из ряда № 5–18, обладающий наименьшими значениями среднеквадратичных отклонений, подвергнуть испытаниям циклическим деформированием вплоть до разрушающих напряжений (520 МПа). Исходные значения внутренних напряжений образца № 18 составляют порядка 200–250 МПа (рис. 10).

Цель данного фрагмента исследований – получить представление о ресурсе сил межатомных связей, о начальных стартовых параметрах \bar{U}^2 , способных обеспечить такой ресурс и о возможностях восстановления структуры, поврежденной в процессе деформирования. Результаты представлены на рис. 11.

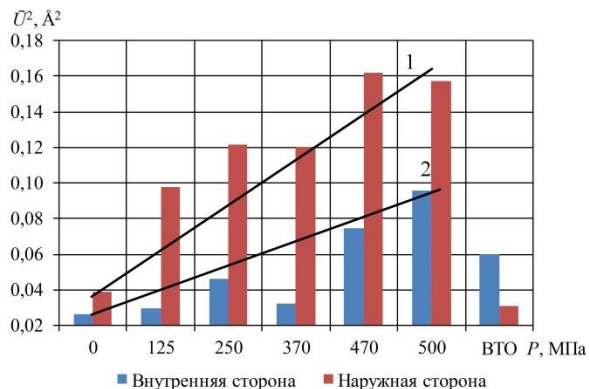


Рис. 11. Изменение среднеквадратичных отклонений атомов \bar{U}^2 при циклическом деформировании образца № 18

Fig. 11. Change of RMSD \bar{U}^2 during cyclic deformation of Specimen No. 18

Видно, что по мере увеличения нагрузки происходит расшатывание и ослабление связей, значения колебательной амплитуды увеличиваются до максимальных (рис. 11). ВТО благоприятно отражается на прочностных характеристиках – среднеквадратичные отклонения от максимальных $0,16 \text{ \AA}^2$ уменьшаются до $0,06 \text{ \AA}^2$ (на внутренней стороне), однако не достигают исходных значений $0,025 \text{ \AA}^2$ (рис. 11). Это можно связать с тем, что в структуре при деформировании возникают дефекты от ультракоротких микротрещин до микротрещин, которые не устраняются при ВТО.

По результатам ВТО становится понятно, что разрыв межатомных связей – процесс неодновременный. В каждый данный момент разрушаются не все связи, а лишь отдельная их часть оказывается доведенной до предельного состояния. Степень восстановления структуры после ВТО является своеобразной мерой накопленной поврежденности. Так, из рис. 11 очевидно, что микроповреждения в наибольшей степени затрагивают внутреннюю поверхность, поскольку она хуже восстанавливается, чем внешняя.

На рис. 12 представлен процесс релаксации внутренних напряжений образца № 18 с переходом их через нуль в сжимающую область.

Смена знака напряжений отмечается при 370 МПа, то есть при напряжениях, близких к пределу текучести ($\sigma_{0,2}=330 \text{ МПа}$ для стали 12Х1МФ). По мере возрастания нагрузки увеличиваются и напряжения сжатия, что связывается с образованием новых поверхностных раздела (субмикротрещин) при каждом акте нагружения. Восстановительная термическая обработка привела к восстановлению разорванных связей

или возникновению новых. Это проявляется в том, что внутренние напряжения I рода после ВТО из области сжимающих напряжений переместились в область растягивающих и понизились до 75 МПа по сравнению с исходными значениями (200–250 МПа) (рис. 12).

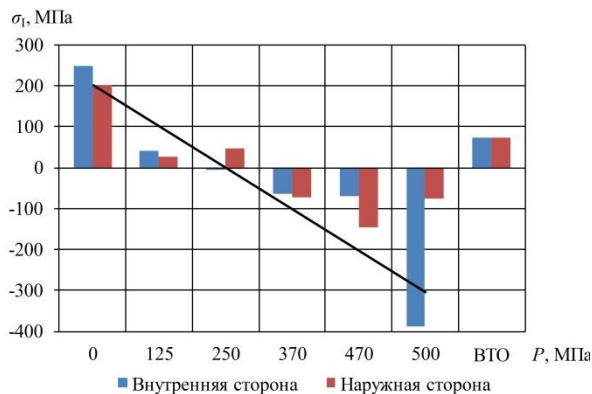


Рис. 12. Изменение внутренних напряжения I рода для образца № 18 при циклическом деформировании

Fig. 12. Change of the first kind internal stresses of Specimen No. 18 during cyclic deformation

Выводы

1. При циклическом механическом нагружении в деформируемом теле возрастают среднеквадратичные смещения атомов, характеризующие изменения структурных состояний системы на наномасштабном уровне.
2. Согласно принятой модели увеличение колебательной амплитуды атомов \bar{U}^2 связано с ослаблением и разрывом межатомных связей и накоплением дефектов.
3. Разрыв межатомных связей и накопление дефектов подтверждается процессом релаксации собственных внутренних напряжений I рода.
4. Максимум \bar{U}^2 при циклическом деформировании достигается при давлениях, соответствующих макромеханической характеристике – пределу прочности, который лимитируется прочностью межатомных связей.
5. Колебательная амплитуда атомов \bar{U}^2 имеет смысл показателя микроповрежденности и интенсивности деградации структуры.
6. Колебательная амплитуда атомов \bar{U}^2 – диагностический признак наступления предельного состояния.
7. При значениях \bar{U}^2 , достигаемых на участке деформаций до предела текучести, возможно восстановление исходной структуры, контролируемое по среднеквадратичным отклонениям атомов и внутренним напряжениям I рода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-01265.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gnevko A.I. Nature of fracture of metals and its analogs in the behavior of other kinds of matter // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2008. – V. 50. – P. 149–163.
2. Лимар О.В., Фоминых В.А. Построение диаграмм растяжения металла труб по их нормативным характеристикам // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. – 2017. – № 3. – С. 34–37.
3. Welding-associated failures in power boilers / I. El-Mahallawi, W. Khalifa, M. El-Saady, M.R. El-Koussy // *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries*. – Giza, Egypt: Department of Metallurgical Engineering, Cairo University, 2006. – P. 387–410.
4. Selection and analysis of material for boiler pipes in a steam plant / V. Lazić, D. Arsić, R.R. Nikolić, D. Rakić, S. Aleksandrović, M. Djordjević, B. Hadzima // *Procedia Engineering*. – 2016. – V. 149. – P. 216–223.
5. Failure analysis of a steam pipe weld used in power generation plant / Q. Chu, M. Zhang, J. Li, Y. Chen, H. Luo, Q. Wang // *Engineering Failure Analysis*. – 2014. – V. 44. – P. 363–370.
6. Bogachev V.A., Pshechenkova T.P., Shumovskaya M.A. Investigations of structural transformation within metal (austenite chromium-manganese steel) at the external surface of steam superheating tubes // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63. – № 1. – P. 294–298.
7. Lokoshchenko A.M. Results of studying creep and long-term strength of metals at the Institute of Mechanics at the Lomonosov Moscow State University (to Yu.N. Rabotnov's Anniversary) // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2014. – V. 55. – P. 118–135.
8. Structural instability in the early decomposition of supersaturated austenite solid solution / A.A. Makeev, L.L. Lyubimova, A.S. Zavorin, A.A. Tashlykov // *Steel in Translation*. – 2009. – V. 39. – P. 1048–1055.
9. Changes in the state of heat-resistant steel induced by repeated hot deformation / L.L. Lyubimova, R.N. Fisenko, A.A. Tashlykov, R.B. Tabakaev // *Metals and Materials International*. – 2018. – V. 24. – P. 121–129.
10. Паркус Г. Неустойчивые температурные напряжения. – М.: Изд-во «Физматгиз», 1963. – 252 с.
11. Grin'E.A., Chernyshev V.V., Bochkarev V.I. Topical problems associated with reliability and safety of equipment at thermal power stations // *Thermal Engineering*. – 2018. – V. 65. – P. 515–523.
12. Investigation into the cyclic strength of the bodies of steam shutoff valves from 10Kh9MFB-Sh steel / V.N. Skorobogatikh, S.A. Kunavin, D.A. Prudnikov, I.A. Shchenkova, A.M. Bazhenov, V.A. Zadoinyi, G.L. Starkovskii // *Thermal Engineering*. – 2018. – V. 65. – P. 106–110.
13. Gladstein V.I., Troitsky A.I., Lyubimov A.A. Evaluation of the long-term operating life of chromium-molybdenum-vanadium steel components with respect to micro-damage // *Power Technology and Engineering*. – 2018. – V. 52. – P. 336–341.
14. Panasyuk V., Dmytrakh I. Some actual problems of fracture mechanics of materials and structures // *Recent Advances Mechanics*. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. – P. 413–435.
15. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Колпишон Э.Ю. Оценка промышленной безопасности объектов тяжелого машиностроения по критериям рисков // *Тяжелое машиностроение*. – 2017. – № 10. – С. 2–10.
16. Диагностика прочности металлических конструкций / Н.Л. Вернези, А.А. Веремеенко, Е.Г. Веремеенко, А.М. Хутиз // *Новые технологии*. – 2012. – № 4. – С. 43–48.
17. Ziman J.M. Principles of the theory of solids. – Cambridge: Cambridge University Press, 1972. – 435 p.
18. Harrison W.A. Solid state theory. – USA: Courier Corporation, 1980. – 554 p.
19. Ibach H., Lüth H. Solid-state physics. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. – 515 p.
20. Ермаков С.С. Физика металлов и дефекты кристаллического строения. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 271 с.
21. Wert C.A., Thomson R.M. Physics of solids. – New York: McGraw-Hill, 1964. – 436 p.
22. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: Изд-во МИСИС, 2002. – 360 с.
23. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.
24. Woodruff D.P., Delchart T.A. Modern techniques of surface science. – Cambridge: Cambridge University Press, 1994. – 586 p.
25. Структурные аспекты циклической прочности / А.С. Заворин, Л.Л. Любимова, А.А. Ташлыков, К.В. Буваков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 124–135.
26. Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Стали и сплавы для высоких температур: Справочник в двух книгах. – М.: Металлургия, 1991. – 382 с.
27. Friedel J., Cullity B.D., Crussard C. Study of the surface tension of a grainboundary in a metal as a function of the orientation of the two grains which the boundary separates // *Acta Metallurgica*. – 1953. – V. 1. – P. 79–92.
28. Иванова В.С. Разрушение металлов. Достижения отечественного металловедения. – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.
29. Регель В.Р., Слущер А.И., Тамашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

Поступила 15.10.2020 г.

Информация об авторах

Заворин А.С., доктор технических наук, профессор научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Любимова Л.Л., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Буваков К.В., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Фисенко Р.Н., инженер организационного отдела Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ташлыков А.А., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Артамонов А.И., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.184.2-192

ROOT-MEAN-SQUARE DEVIATIONS OF ATOMIC POSITIONS – NANOSCALE INDICATOR OF SURFACE CONDITION

Alexander S. Zavorin¹,
zavorin@tpu.ru

Lyudmila L. Lyubimova¹,
lll@tpu.ru

Konstantin V. Buvakov¹,
buvakov@tpu.ru

Roman N. Fisenko¹,
ronifis@tpu.ru

Alexander A. Tashlykov¹,
tashlykov@tpu.ru

Alexander I. Artamontsev¹,
a_art@tpu.ru

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

The study relevance is associated with the need of increasing the reliability of welded joints in steam power plants, hence with a rational use of product materials due to improvement and development of methods for studying the physical characteristics.

Purpose of the study is to introduce the new nanoscale structural criteria of the third kind to assess the surface condition.

Object of the study is specimens of heat-resistant steel tubular heating surfaces of steam boilers.

Methods include physical modeling of operating conditions by thermal cycling in the MIMP-10UE electric furnace, cyclic cold deformation by means of a hydraulic press, roentgenometry of specimens with evaluation of the root-mean-square deviations and internal structural stresses using the DRON X-ray diffractometers, analysis of surface morphology with the portable electron microscope PENSCKOPE with 20x magnification.

Results. Experimental studies, related to quantitative evaluation of the amplitude of atomic vibration and its evolution during cyclic thermal and mechanical loads, resulted in introduction of a new diagnostic parameter – the amplitude of atomic vibration \bar{U}^2 , reflecting the fundamental nature of interatomic bonds. Correlation between the root-mean-square deviations of atoms (the microscale level of properties), which are the microstructural characteristics of the third kind, and the macromechanical characteristics $\sigma_{0.2}$ and σ_B (the macroscale level of properties) was demonstrated. As the offset yield point and ultimate strength point are related to strength and breaking, then the root-mean-square deviations of atoms can be used as an indicator for damage and an indicator of limit states. The parameter \bar{U}^2 can also be a characteristic of the current physical state of metal. The new method for assessment of current and limit states was suggested. It was shown that structure restoration is monitored at the atomic microscale level, using the vibration amplitude and the stresses of the first kind.

Key words:

Steel, heating surface, cyclic mechanical deformation, thermal cycling, X-ray diffraction, root-mean-square deviations, internal stresses of the first kind.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 18-08-01265.

REFERENCES

1. Gnevko A.I. Nature of fracture of metals and its analogs in the behavior of other kinds of matter. *Metal Science and Heat Treatment*, 2008, vol. 50, pp. 149–163.
2. Limar O.V., Fominykh V.A. Designing the Load-elongation curve diagram for pipelines according to the accepted standards. *Truboprovodny transport teoriya i praktika*, 2017, no. 3, pp. 34–37. In Rus.
3. El-Mahallawi I., Khalifa W., El-Saady M., El-Koussy M.R. Welding-associated failures in power boilers. *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries*. Giza, Egypt, Department of Metallurgical Engineering, Cairo University, 2006. pp. 387–410.
4. Lazić V., Arsić D., Nikolić R.R., Rakić D., Aleksandrović S., Djordjević M., Hadzima B. Selection and analysis of material for boiler pipes in a steam plant. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 149, pp. 216–223.
5. Chu Q., Zhang M., Li J., Chen Y., Luo H., Wang Q. Failure analysis of a steam pipe weld used in power generation plant. *Engineering Failure Analysis*, 2014, vol. 44, pp. 363–370.
6. Bogachev V.A., Pshechenkova T.P., Shumovskaya M.A. Investigations of structural transformation within metal (austenite chromium-manganese steel) at the external surface of steam superheating tubes. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 294–298.
7. Lokoshchenko A.M. Results of studying creep and long-term strength of metals at the Institute of Mechanics at the Lomonosov Moscow State University (to Yu.N. Rabotnov's Anniversary). *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, vol. 55, pp. 118–135.
8. Makeev A.A., Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Tashlykov A.A. Structural instability in the early decomposition of supersaturated austenite solid solution. *Steel in Translation*, 2009, vol. 39, pp. 1048–1055.

9. Lyubimova L.L., Fisenko R.N., Tashlykov A.A., Tabakaev R.B. Changes in the state of heat-resistant steel induced by repeated hot deformation. *Metals and Materials International*, 2018, vol. 24, pp. 121–129.
10. Parkus G. *Neustanovivshiesya temperaturnye napryazheniya* [Unsteady thermal stresses]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 252 p.
11. Grin E.A., Chernyshev V.V., Bochkarev V.I. Topical problems associated with reliability and safety of equipment at thermal power stations. *Thermal Engineering*, 2018, vol. 65, pp. 515–523. In Rus.
12. Skorobogatikh V.N., Kunavin S.A., Prudnikov D.A., Shchenkova I.A., Bazhenov A.M., Zadoyni V.A., Starkovskii G.L. Investigation into the Cyclic Strength of the Bodies of Steam Shutoff Valves from 10Kh9MFB-Sh Steel. *Thermal Engineering*, 2018, vol. 65, pp. 106–110. In Rus.
13. Gladstein V.I., Troitsky A.I., Lyubimov A.A. Chromium-molybdenum-vanadium steel components with respect to micro-damage. *Power Technology and Engineering*, 2018, vol. 52, pp. 336–341.
14. Panasyuk V., Dmytrakh I. Some actual problems of fracture mechanics of materials and structures. *Recent Advances Mechanics*. Dordrecht, Springer Netherlands Publ., 2011. pp. 413–435.
15. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Kolpishon E.Y. Otsenka promyshlennoy bezopasnosti ob'yektov tyazhelogo mashinostroeniya po kriteriyam riskov [Safety evaluation of heavy engineering facilities by risk criteria]. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*, 2017, no. 10, pp. 2–10.
16. Vernezi N.L., Veremeenko A.A., Veremeenko E.G., Khoutyz A.M. Diagnostika prochnosti metallicheskih konstruksiy [Diagnostics of strength of metal structures]. *Novye Tekhnologii*, 2012, no. 4, pp. 43–48. In Rus.
17. Ziman J.M. *Principles of the theory of solids*. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 1972. 435 p.
18. Harrison W.A. *Solid state theory*. USA, Courier Corporation Publ., 1980. 554 p.
19. Ibach H., Lüth H. *Solid-State Physics*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2009. 515 p.
20. Ermakov S.S. *Fizika metallov i defekty kristallicheskogo stroeniya* [Physics of metals and crystal structure defects]. Leningrad, Leningr. Univ. Publ., 1989. 271 p.
21. Wert C.A., Thomson R.M. *Physics of solids*. New York, McGraw-Hill, 1964. 436 p.
22. Gorelik S.S., Skakov Y.A., Rastorguev L.N. *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 2002. 358 p.
23. Rusakov A.A. *Rentgenografiya metallov* [X-ray analysis for metals]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. 480 p.
24. Woodruff D.P., Delchart T.A. *Modern techniques of surface science*. Cambridge, Cambridge University Press, 1994. 586 p.
25. Zavorin A.S., Lyubimova L.L., Tashlykov A.A., Buvakov K.V. Structural aspects of cyclical strength of a superheater weldment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 124–135. In Rus.
26. Maslenkov S.B., Maslenkova E.A. *Stali i splavy dlya vysokikh temperatur* [Steel and alloys for high temperatures]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 382 p.
27. Friedel J., Cullity B.D., Crussard C. Study of the surface tension of a grainboundary in a metal as a function of the orientation of the two grains which the boundary separates. *Acta Metallurgica*, 1953, vol. 1, pp. 79–92.
28. Ivanova V.S. *Razrusheniye metallov. Dostizheniya otechestvennogo metallovedeniya* [Failure of metals. Achievements of domestic metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 168 p.
29. Regel V.R., Slucker A.I., Tamashevskiy E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [Kinetic nature of strength of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 560 p.

Received: 15 October 2020.

Information about the authors

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

Lyudmila L. Lyubimova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin V. Buvakov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Roman N. Fisenko, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Tashlykov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander I. Artamontsev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.314.21.027.3.045:681.518.54

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Лавринович Алексей Валериевич¹,
lavrinovich86@yandex.ru

Мытников Алексей Владимирович²,
mytnikov66@mail.ru

¹ Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

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

Актуальность исследования. Все стадии производства и переработки полезных ископаемых включают объемный технологический комплекс, доминирующая роль в котором принадлежит электроэнергетическим системам, обеспечивающим работу всех основных узлов и агрегатов. Существенный класс высоковольтного оборудования таких систем представляют распределительные силовые трансформаторы и шунтирующие реакторы. Выход из строя трансформаторного оборудования вызывает внеплановую остановку технологического цикла, аварийную ситуацию и финансовые потери. Этого можно избежать, обеспечив надежную работу электрооборудования путем проведения качественной диагностики, позволяющей оценить остаточный ресурс работы трансформатора или реактора. Стандартные технологии, такие как измерения сопротивления постоянному току, коэффициента абсорбции и тангенса угла диэлектрических потерь, не позволяют обнаруживать дефект обмотки на ранней стадии развития, а потому не могут считаться эффективными. Практически во всех мировых энергосистемах перспективным и рекомендованным к применению считается комплекс FRA, представляющий собой техническую реализацию метода анализа частотных характеристик. Однако данная технология сталкивается с трудностями технического и организационного характера при внедрении в энергосистемах России. Приборная база и программное обеспечение не всегда соответствуют требованиям и нормам испытаний электрооборудования сетей РФ. Как результат имеет место высокий процент ошибочных заключений о результатах контроля состояния. Ситуацию осложняет тот факт, что патент на использование технологии FRA принадлежит институтам США, Канады и ряда Европейских стран. Учитывая недружелюбную политическую ситуацию, ряд санкций и ограничений на экспорт техники и технологий, дальнейшее использование технологии FRA может оказаться проблематичным. Современная собственная технология, отвечающая требованиям сегодняшнего дня, в этой сфере в РФ отсутствует. Поэтому разработка надежного диагностического комплекса, учитывающего технические, климатические и иные особенности электроэнергетических систем РФ и позволяющего эффективно проводить контроль состояния обмоток с учетом специфики отечественного трансформаторного оборудования, является актуальной задачей.

Цель. Исследовать эффективность работы диагностического комплекса на основе зондирующих импульсов наносекундной длительности на реальном трансформаторном оборудовании. Провести сравнительный анализ результатов, контроля состояния обмоток трансформатора разработанного комплекса и комплекса FRA.

Методы. На реальном трансформаторе ТМ-160/10-У1 на высоковольтной фазе созданы дефекты обмотки, такие как короткозамкнутые витки и механическое смещение. При помощи разработанного диагностического комплекса зондирующий импульс наносекундной длительности подавался на обмотку одной из фаз. На соседней обмотке регистрировался импульс-отклик. С помощью электронных осциллографов Tektronix типа TDS-1012 осуществлялась регистрация зондирующего импульса и импульса-отклика. Измерения проводились для тех же дефектных состояний обмотки с применением комплекса FRA.

Результаты. На реальном трансформаторе экспериментально исследована эффективность разработанного диагностического комплекса для контроля состояния обмоток трансформаторов на основе наносекундных зондирующих импульсов. Показано, что эффективность контроля состояния обмоток трансформатора при помощи разработанного комплекса оказывается не хуже, а в ряде случаев превосходит эффективность комплекса FRA.

Ключевые слова:

Контроль состояния, импульсный метод, коммутационный импульс, дефект обмотки, эффективность диагностики.

Введение

Надежная работа энергетического оборудования является фундаментом, на котором основано эффективное функционирование всей технологической цепи добычи и переработки геологических ресурсов. Аварийный отказ одной единицы электрооборудования ведет к техническим проблемам и финансовым потерям. Применяемые методы контроля состояния трансформаторов не вполне соответствуют требованиям сегодняшнего дня и способны выявить развитый дефект, что не приемлемо на современном этапе

развития индустрии [1–4]. Особенно это относится к выявлению дефектов обмоток трансформаторов [2–5]. Технология импульсного дефектографирования является наиболее эффективным методом и позволяет выявлять дефекты обмотки на ранних стадиях развития [6–8]. Данный метод успешно развивался как в стенах научной лаборатории [7–9], так и в практике применения в энергосистемах [9–11]. Не смотря на интенсивное развитие в 1970–1980 гг. в бывшем СССР, разработки в области указанной технологии были прекращены по ряду технических, организаци-

онных и финансовых причин. В настоящее время практически во всех западных энергосистемах интенсивно развивается технология частотного анализа или FRA (frequency-response analysis), которая реализуется с помощью диагностических комплексов FRA [12–18]. Более того, данный метод контроля состояния обмоток трансформаторов признан как наиболее чувствительный и рекомендован к применению соответствующим комитетом СИГРЭ [19]. Метод частотного анализа (МЧА) внедряется в энергосистемах России, однако при его адаптации имеет место ряд проблем [20]. К тому же необходимо принимать в расчет факт, что технология FRA запатентована в лабораториях стран Северной Америки, приборная база производится в странах Евросоюза. Учитывая непростую политическую ситуацию и ряд постоянно расширяющихся ограничений, велика вероятность полного прекращения и невозможности использования технологии FRA в энергосистемах России.

Однако результаты, полученные в лаборатории техники высоких напряжений Инженерной школы энергетики ТПУ, подтверждают тот факт, что импульсный метод диагностики обмоток незаслуженно забыт. Он не исчерпал своего потенциала и не уступает по эффективности технологии FRA [21–24]. Поэтому реализация импульсного метода контроля состояния обмоток на основе зондирующего импульса наносекундной длительности в виде диагностического комплекса является важной задачей, решению которой посвящена настоящая статья.

Постановка задачи исследования

Разработать диагностический комплекс для высокоэффективного контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов на основе зондирующих импульсов наносекундной длительности. Исследовать эффективность работы разработанного комплекса на реальном трансформаторном оборудовании. Провести сравнительный анализ результатов, контроля состояния обмоток трансформатора разработанного комплекса и комплекса FRA, который принят в качестве основной технологии в ведущих энергосистемах Америки, Азии, Австралии и Евросоюза.

Теория и принцип методов низковольтных импульсов и метода частотного анализа

Метод низковольтных импульсов (НВИ) применяется в электроэнергетических системах СССР с начала 1970-х гг.

Методика измерений состоит в подаче прямоугольного зондирующего импульса напряжением 100–500 В на одну из обмоток или в нейтраль трансформатора от специального генератора. Одновременно происходит осциллографирование реакции обмоток на воздействие приложенного импульса – снимается осциллограмма напряжения на измерительных сопротивлениях, которые подключены к другим обмоткам. Основой метода является принцип последовательного импульсного дефектографирования. Вначале происходит снятие нормограмм с заведомо здорового трансформатора на заводе-изготовителе или

перед вводом в эксплуатацию. В дальнейшем их сравнивают с дефектограммами – осциллограммами, полученными при последующих измерениях после ввода трансформатора в эксплуатацию. Состояние обмоток трансформатора определяют путем сравнения между собой нормограмм и дефектограмм по определенной методике. Отклонения дефектограммы от нормограммы свидетельствуют о наличии электрических повреждений или механических деформаций обмоток. Если нормограммы отсутствуют, то анализ состояния обмоток проводится путем сравнения осциллограмм разных фаз трансформатора. Эффективность метода НВИ для обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов объясняется его большой чувствительностью к изменениям геометрических размеров. Даже небольшие механические перемещения в обмотках существенно изменяют емкость отдельных элементов (межвитковые, межкатушечные), а существенные деформации приводят к изменениям индуктивности деформированных элементов. Все это изменяет собственные частоты колебаний, что фиксируется на осциллограммах импульсных токов и напряжений [6–10].

Не смотря на высокую (по сравнению с другими методами) чувствительность метода НВИ и его длительное совершенствование (в период 1966–1988 гг.), его погрешность оставалась в ряде случаев неудовлетворительной для практического применения. Это объяснялось неточностью и субъективизмом при анализе результатов дефектографирования. Испытания трансформаторов на динамических стендах во Всесоюзном Электротехническом Институте подтвердили, что механические повреждения обмоток трансформаторов вследствие электродинамических воздействий могут сопровождаться значительно меньшими изменениями Z_{K3} , что отражено и в [9].

Преимущества метода НВИ: очень высокая чувствительность к большому количеству повреждений; возможность определять не только фазу, но и обмотку, в которой произошло повреждение.

К недостаткам метода НВИ следует отнести то, что высокая воспроизводимость результатов измерений возможна только при обеспечении полной идентичности измерений, интервал времени между которыми может составлять годы: схема и процедура измерений, используемые кабели и соединители, их взаимное расположение при испытаниях. Интерпретация результатов измерений требует высокой квалификации обслуживающего персонала [8–10]. Метод НВИ не позволяет количественно оценить возникшие остаточные деформации, требует отключения и расшивки трансформатора, что не дает возможности применять системы мониторинга под рабочим напряжением, контролирующие механическое состояние обмоток при протекании сквозных токов КЗ [10].

Метод анализа частотных характеристик разработан в Канаде в 1978 г. в фирме «Онтарио – Гидро». МЧА (в англоязычной литературе – FRA от Frequency Response Analysis) основан на сравнении полученной в данный момент частотной характеристики обмотки с характеристикой, снятой прежде на том же или на

однотипном трансформаторе. Процедура измерений по методу частотного анализа предполагает запись приложенного импульса и соответствующего ему отклика с использованием высокоточных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). После чего результаты преобразуются в частотную область с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Рассчитанная таким образом передаточная функция зависит только от параметров испытуемого объекта и не зависит от приложенного сигнала и схемы измерений. Поэтому изменения в объекте могут быть отчетливо идентифицированы и отделены от проявлений внешних факторов, что существенно облегчает анализ результатов [16–19].

Параллельно развивалось другое направление данного метода – вместо импульсного воздействия на ввод обмотки подавалось синусоидальное напряжение, которое изменяется по частоте в широком диапазоне, а с других вводов снималось напряжение отклика. По результатам строилась амплитудно-частотная характеристика – реакция обмоток на воздействие. Оба способа получили достаточно широкое распространение.

Отклики обмоток анализируются по следующим проявлениям:

- различия между сигналами-откликами отдельных фаз трансформатора;
- различия между сигналами-откликами трансформаторов аналогичной конструкции;
- изменения амплитудно-частотных характеристик, полученных на одном трансформаторе, но в разное время.

Двухканальный аналого-цифровой преобразователь записывает по каналу № 1 сигнал, который подается на ввод обмотки, а по каналу № 2 – реакцию обмотки на воздействие. После этого рассчитывается передаточная функция. Передаточная функция представляет собой отношение спектров входного и выходного сигналов. Степень отличия передаточных функций, рассчитанных до и после воздействия на трансформатор электродинамических сил короткого замыкания или других механических воздействий, производится с помощью разных средств анализа.

Не смотря на безусловные достоинства метода FRA, процент ошибок остается довольно высоким. В ряде случаев при наличии дефекта был поставлен диагноз «здоров» и дефект не был распознан. В то же время случались ситуации, при которых трансформатор с исправными обмотками был забракован и выведен в ремонт.

Исследование эффективности разработанного диагностического комплекса на реальном трансформаторном оборудовании

Для установления степени чувствительности и достоверности контроля состояния и потенциальной производственной эффективности в условиях реальной энергосистемы были проведены исследования на реальном трансформаторе. Исследования состояли в обследовании исправного и дефектного трансформатора одинаковой марки, выпущенных на одном и том

же предприятии, эксплуатируемых в практически одинаковых условиях, как разработанным методом наносекундных импульсов, так и методом анализа частотных характеристик.

Силовые трансформаторы марки ТМ-160/10-У1 находились в цехе по ремонту оборудования Ишимского ТПО, ОАО «Тюменьэнерго», г. Ишим, Тюменской области. Основные данные исследуемых трансформаторов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные объекта обследования
Table 1. Data of investigated object

Наименование Name of option	Данные объекта Data of investigated object
Место расположения трансформатора Transformer location	Цех по ремонту оборудования Ишимского предприятия «Тюменьэнерго», г. Ишим, Тюменской области Ishim repair plant «Tyumenenerg», Ishim, Tyumen region
Наименование объекта Call of object	Трансформатор Transformer
Тип трансформатора Type of transformer	ТМ-160/10-У1 ТМ-160/10-У1
Дата выпуска, завод изготовитель Date of issue, Production plant	1993 г., «Алтайский трансформатор», г. Барнаул «Altay transformer», Barnaul
Дата ввода в эксплуатацию Date of work beginning	1993
Схема соединения обмоток Winding connection scheme	Y/Y ₀
Номинальная мощность трансформатора Transformer power	160 кВА (kVA)
Номинальное напряжение обмотки высокого напряжения Operating voltage of high voltage winding	10 кВ (kV)
Номинальное напряжение обмотки низкого напряжения Operating voltage of low voltage winding	0,4 кВ (kV)
Вид охлаждения Cooling type	Масляный Oil type
Проблемные ситуации во время эксплуатации Problem situation during work	В результате грозы было повреждение обмотки высокого напряжения, затем трансформатор отремонтирован в ремонтном цехе Ишимского завода As result of lightning, the high voltage winding has been damaged. Than the transformer was repaired at the Ishim plant
Полная масса Total mass	800 кг (kg)
Масса масла Oil mass	225 кг (kg)

Внешний вид исследуемых трансформаторов, как исправного, так и с дефектным состоянием обмоток, приведен на рис. 1, 2, соответственно.

Основная цель исследования состояла в осуществлении контроля обмоток трансформаторов в исправном и дефектном состояниях двумя методами, а именно: методом наносекундных импульсов и FRA; сопоставлении и анализе полученных результатов.



Рис. 1. Внешний вид обследуемого исправного трансформатора

Fig. 1. View of investigated transformer with normal condition



Рис. 2. Внешний вид обследуемого трансформатора с дефектным состоянием обмоток

Fig. 2. View of investigated transformer with failed windings

Схема контроля состояния обмоток трансформатора, включающая генератор зондирующих импульсов наносекундного диапазона, осциллографы, контролирующие параметры зондирующего импульса и сигналы отклика, расположение фаз обмоток низкого напряжения (НН) и высокого напряжения (ВН), показана на рис. 3. В процессе измерений переключатель без возбуждения (ПБВ) находился в положении 2. Количество витков обмотки ВН – 1312, количество витков обмотки НН – 160.

Процедура контроля состояния обмоток состояла в подаче на одну из обмоток зондирующего импульса 200 В, 520–25 нс, и снятия сигнала отклика соответствующему переходному процессу с другой обмотки. В случае использования метода FRA применялся приборный комплекс FRAX-150, на экране которого происходило отображение амплитудно-частотных зависимостей, предварительно обработанных с помощью программно-аппаратных средств.

Основная цель экспериментов, результаты которых представлены ниже, выявить эффективность и провести сравнительный анализ разрабатываемого метода с методом FRA. Ниже приводится результат сравнения двух сигналов отклика при различных ситуациях в обмотках или изменений в объеме транс-

форматора в целом. Сравнение результатов измерений выполнялось с использованием специальной программы, разработанной для указанных целей.

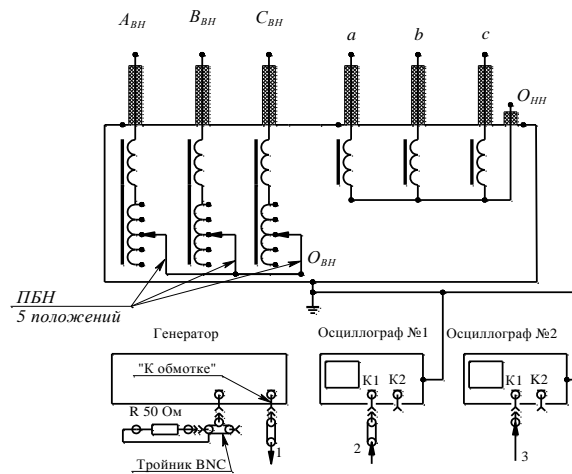


Рис. 3. Схема подключения приборов контроля при обследовании трансформатора

Fig. 3. Scheme of measuring devices connection at the winding control

Выбор критерия эффективности. Одним из основных критериев эффективности метода контроля состояния является его чувствительность. Чувствительность, в свою очередь, можно оценить, используя понятие среднего интеграла импульса напряжения. Средний интеграл импульса напряжения определялся путем усреднения интеграла импульса напряжения 27 осциллограмм для случая отсутствия дефектного состояния. Средний интеграл импульса напряжения на обмотке ВН был равен $8,75 \times 10^{-5}$ (Вб). Отклонение от среднего интеграла импульса напряжения от импульса к импульсу составляет величину, не превышающую 2 %. Можно считать, что это погрешность (шум) при определении интеграла импульса напряжения на обмотке ВН. Средний интеграл импульса напряжения на обмотке НН составил $7,52 \times 10^{-5}$ (Вб). Отклонение от среднего составило 1,6 %. Данные получены по 27 осциллограммам. Отклонение интеграла импульса напряжения от среднего для импульса-отклика по трем осциллограммам колебалось в пределах 3–4 %. Таким образом, можно полагать, что при зондировании погрешность (шум) лежит в пределах 3–4 % от интеграла импульса. Поэтому для оценки состояния обмотки принимаем тот факт, что если для нормограммы и дефектограммы интеграл импульса напряжения отличаются более чем на 5 % (более, чем шум), то это отклонение можно считать индикатором наличия дефектного состояния в обмотке трансформатора.

Исследование чувствительности при наличии дефекта типа «межвитковое короткое замыкание» в обмотке ВН

Для сравнения чувствительности предлагаемого комплекса и комплекса FRAX в обмотке ВН фазы С был организован дефект типа «межвитковое короткое замыкание». Внешний вид обмотки с дефектом приведен на рис. 4, 5.



Рис. 4. Вид высоковольтной обмотки с дефектом типа «межвитковое короткое замыкание»

Fig. 4. View of high voltage winding with fail of short circuit turn type



Рис. 5. Дефект типа «межвитковое короткое замыкание» на обмотке ВН

Fig. 5. Fail of short circuit turn type at the high voltage winding

Перед импульсным зондированием был проведен контроль состояния обмотки путем измерения сопротивления. Сопротивление до закоротки трех витков составило соответственно: «А–С» – 0,1046 Ом,

«В–С» – 0,1042 Ом, после закоротки «А–С» – 0,1046 Ом, «В–С» – 0,1043 Ом (измерено миллиомметром типа ПТФ-1). Таким образом, измерением сопротивления наличие трех короткозамкнутых витков не обнаруживается.

Диагностика наносекундным импульсом. На рис. 6 для примера приведены результаты сравнения сигналов отклика на наносекундный импульс при отсутствии дефектов – синяя кривая, и сигнал в случае межвиткового короткого замыкания – красная кривая. Для всех случаев нейтраль заземлена, остальные выводы обмоток находятся в режиме холостого хода.

Обработка осциллограмм по разработанной программе показывает, что интеграл разности импульсов напряжения нормограммы и дефектограммы равен $3,4 \times 10^{-6}$ (в диапазоне времени $0 \dots 2,2 \times 10^{-6}$ с), интеграл импульса напряжения нормограммы (в диапазоне времени $0 \dots 2,2 \times 10^{-6}$ с) – $1,01 \times 10^{-5}$, интеграл разности импульсов напряжения нормограммы и дефектограммы в процентах от интеграла импульса напряжения отклика трансформатора равен 34 %. Этот результат показывает, что использование предложенной методики обработки осциллограмм позволяет при закороченных трех витках обмотки ВН зарегистрировать значимое отличие между нормограммой и полученной дефектограммой. В табл. 2 приведены результаты обработки осциллограмм по приведенной выше методике для различных комбинаций приложения зондирующего импульса и отклика. Измерение сопротивления обмоток ВН омметром не выявило никакого различия между неповрежденной обмоткой и обмоткой с тремя закороченными витками при общем количестве витков обмотки ВН 1312, в то время как методом наносекундных импульсов по разработанной методике фиксируется различие в диапазоне от 35 до 55 %, которое зависит от комбинации обмотки, к которой прикладывается зондирующий импульс, и обмотки, на которой регистрируется импульс-отклик.

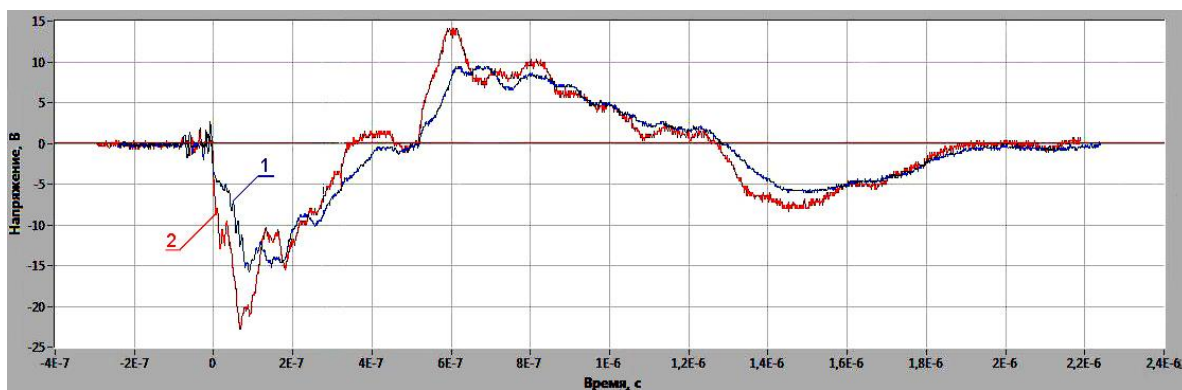


Рис. 6. Зондирующий импульс подается на обмотку фазы А, сигнал отклика регистрируется на фазе а

Fig. 6. Probing impulse is applied to winding of phase A, response is measured at the phase a

Из табл. 2 видно, что наилучшая чувствительность имеет место при комбинации, когда зондирующий импульс, подаваемый на обмотку ВН, и импульс-отклик, получаемый с обмотки НН, снимаются с пары обмоток одной фазы. Например, если дефект в об-

мотке фазы С, то наибольший интеграл разности напряжения импульсов-откликов получается, когда зондирующий импульс подаем на обмотку ВН фазы С, а отклик получаем с обмотки НН фазы с.

Таблица 2. Отличие нормограмм от дефектограмм при различных комбинациях приложения зондирующего импульса и отклика

Table 2. Difference of normograms and failgrams at various combinations of supply points for probing impulse and response

Обмотка, на которую подается зондирующий импульс Winding which is applied of probing impulse	Обмотка, на которой регистрируется импульс-отклик Winding which is measured of response impulse	Интеграл разности импульсов-откликов напряжения бездефектной обмотки и при трех закороченных витках фазы C, B6 Difference integral of response impulses of healthy winding and three short-circuit turns at the phase C, Vb	Интеграл разности импульсов напряжения, в % от интеграла импульса-отклика неповрежденной обмотки Difference integral of voltage impulses in percentage from response impulse integral of healthy winding, %
A	b	$8,7 \times 10^{-7}$	45
A	c	$8,9 \times 10^{-7}$	47
B	c	$9,3 \times 10^{-7}$	47
C	a	$8,7 \times 10^{-7}$	44
C	c	$3,5 \times 10^{-6}$	55

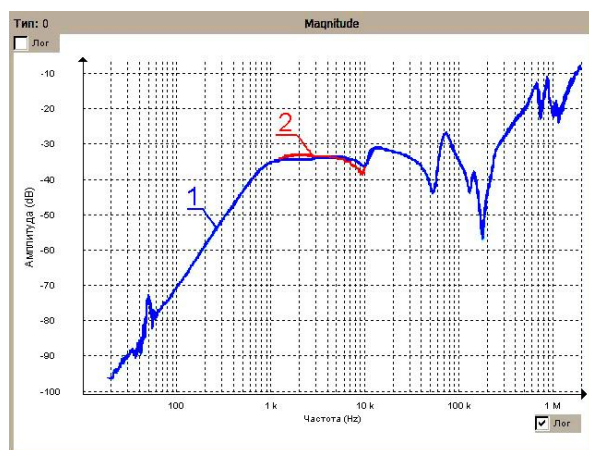


Рис. 7. Зондирующий импульс подается на обмотку фазы А, сигнал отклика регистрируется на фазе а

Fig. 7. Probing impulse is applied to the winding of phase A, response is measured at the phase a

Диагностика прибором FRAX-150. На рис. 7 приведены результаты измерений, проведенных методом FRA.

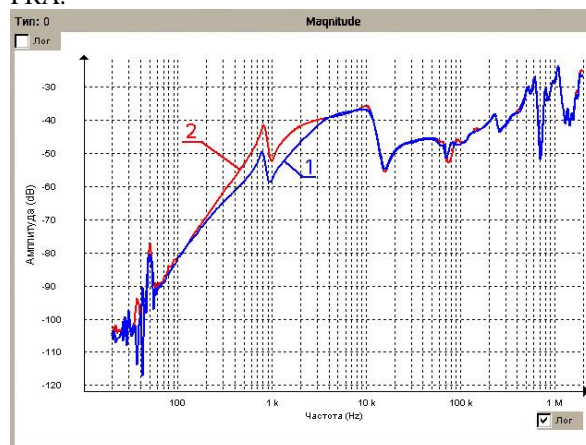


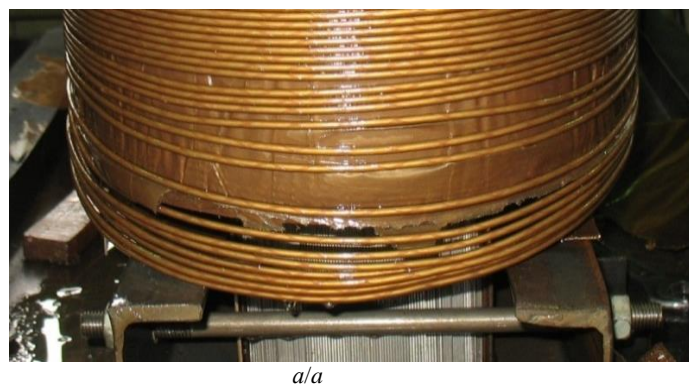
Рис. 8. Зондирующий импульс подается на обмотку фазы А, сигнал отклика регистрируется на фазе с

Fig. 8. Probing impulse is applied to the winding of phase A, response is measured at the phase c

Результаты, полученные с применением метода FRA, показывают, что наилучшая чувствительность реализуется при комбинации, когда зондирующее напряжение и отклик снимаются с пары обмоток одной фазы, как и в случае с методом наносекундных импульсов. Отличие в амплитудно-частотной характеристике наблюдаются в диапазоне частот от 200 Гц до 300 кГц. Метод FRA и метод наносекундных импульсов чувствительны к коротким замыканиям нескольких витков обмотки ВН и позволяют их обнаружить.

Диагностика дефекта типа «аксиальное смещение витков» методом наносекундных импульсов

Для исследования чувствительности методов при наличии дефекта типа «аксиальное смещение витков» на обмотке фазы А был организован указанный дефект, охватывающий 14 витков. Внешний вид обмотки ВН с дефектом типа «аксиальное смещение витков» показан на рис. 9.



а/а



б/б

Рис. 9. Внешний вид высоковольтной обмотки фазы А с дефектом типа «аксиальное смещение витков»: а) фронтальный вид катушки трансформатора, б) вид катушки сбоку

Fig. 9. View of high voltage phase A containing a fail type axial shift of turns: a) front view of winding, b) side view of the winding

Ниже приведены результаты сравнения сигналов отклика на наносекундный импульс при отсутствии дефектов – синяя кривая, и сигнал в случае аксиального смещения витков – красная кривая, при различных комбинациях места подачи зондирующего им-

пульса и места регистрации отклика. Для всех случаев нейтраль заземлена, остальные выводы обмоток находятся в режиме холостого хода. На рис. 10 приведены совмещенные осциллограммы-отклики, полученные с обмоток фазы а.

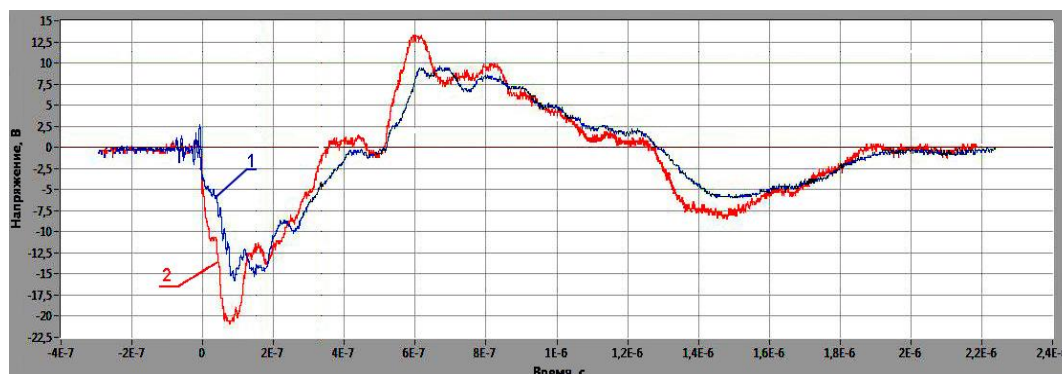


Рис. 10. Зондирующий импульс подается на обмотку фазы А, сигнал отклика регистрируется на фазе а
Fig. 10. Probing impulse is applied to the winding of phase A, response is measured at the phase a

В табл. 3 приведены результаты обработки осциллограмм аналогичные результатам, отраженным в табл. 2, для случая «аксиальное смещение витков» в обмотке ВН фазы А. Обработка сигналов проводилась по приведенной выше методике: разность интегралов импульсов-откликов для неповрежденной обмотки и обмотки со смещенными витками (рис. 10) сравнивался с интегралом импульса-отклика зондирующего сигнала.

Таблица 3. Отличие нормограмм от дефектограмм при различных комбинациях приложения зондирующего импульса и отклика при аксиальном смещении 14 витков высоковольтной обмотки фазы А

Table 3. Difference of normograms and failgrams at various combinations of applied points for probing impulse and response at the axial shift of 14 turns of high voltage phase A

Обмотка, на которую подается зондирующий импульс Winding which is applied of probing impulse	Обмотка, на которой регистрируется импульс-отклик Winding which is measured of response impulse	Интеграл разности импульсов-откликов напряжения бездефектной обмотки и при 14 аксиально смещенных витках фазы А, Вб Difference integral of response impulses of healthy winding and 14 turns in the axial shift at the phase A, Vb	Интеграл разности импульсов напряжения, в % от интеграла импульса-отклика неповрежденной обмотки Difference integral of voltage impulses in percentage from response impulse integral of healthy winding, %
А	а	$3,4 \times 10^{-6}$	38
А	с	$9,3 \times 10^{-7}$	48
С	а	$9,5 \times 10^{-7}$	48

Результаты табл. 3 показывают значимое отличие импульсов-откликов нормограмм от дефектограмм. Установить предел чувствительности в данном случае вызывает затруднения, т. к. ситуация со смещением витков приводит к изменению соотношений емкостей

практически во всех фазах и существенно зависит от геометрических размеров катушек трансформатора и количества сдвинутых в аксиальном направлении витков. По-видимому, для каждого типа трансформатора это будет индивидуальный параметр.

Диагностика дефекта типа «аксиальное смещение витков» методом FRA с применением прибора FRAX-150

На рис. 11 приведены результаты измерений методом FRA для случая: зондирующий сигнал прикладывается к обмотке ВН А, сигнал-отклик снимается с обмотки НН а. Сигналы наложены для бездефектной обмотки и для обмотки со смещенными в аксиальном направлении 14 витками обмотки ВН фазы А.

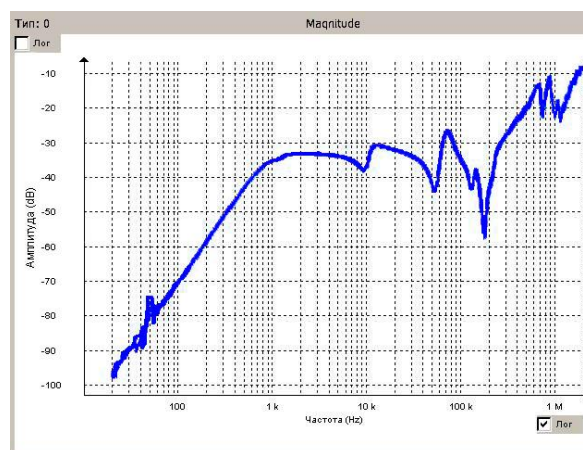


Рис. 11. Зондирующий импульс подается на высоковольтную обмотку фазы А, сигнал отклика регистрируется на фазе а

Fig. 11. Probing impulse is applied to the winding of phase A, response is measured at the phase a

На рис. 12 приведены результаты измерений методом FRA для случая: зондирующий сигнал прикладывается к обмотке ВН А, сигнал-отклик снимается с

обмотки НН с. Сигналы наложены для бездефектной обмотки и для обмотки со смещенными в аксиальном направлении 14 витками обмотки ВН фазы А.

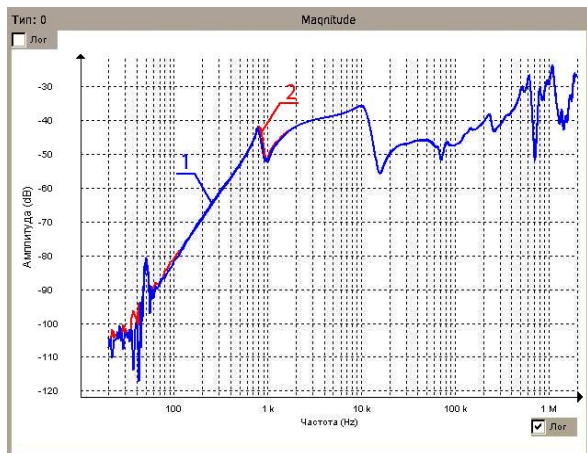


Рис. 12. Зондирующий импульс подается на обмотку фазы А, сигнал отклика регистрируется на фазе с
Fig. 12. Probing impulse is applied to the winding of phase A, response is measured at the phase c

На рис. 13–15 приведены аналогичные результаты измерений методом FRA для других случаев приложения зондирующего сигнала и сигнала-отклика. Во всех случаях сигналы наложены для бездефектной обмотки и для обмотки со смещенными в аксиальном направлении 14 витками обмотки ВН фазы А.

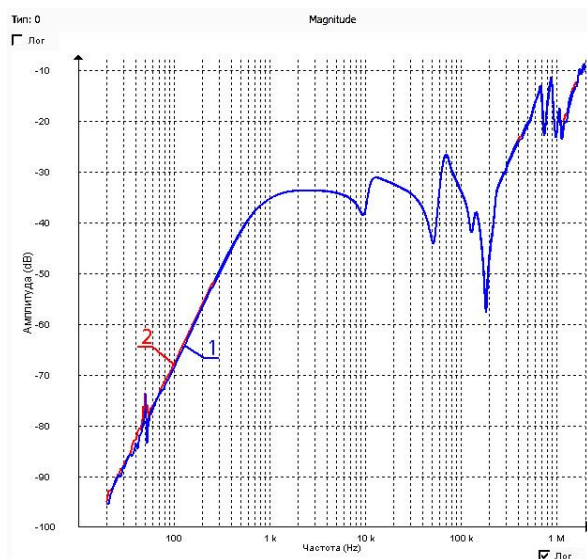


Рис. 13. Зондирующий импульс подается на обмотку фазы В, сигнал отклика регистрируется на фазе b
Fig. 13. Probing impulse is applied to the winding of phase B, response is measured at the phase b

Обсуждение результатов

Из приведенных результатов контроля состояния обмоток по методу следует, что выявить характерное различие между ними довольно трудно. Аналогичные картины наблюдаются при других сочетаниях схем. Делать вывод о наличии дефектного состояния об-

мотки на основании приведенных выше результатов анализа АЧХ, полученных при измерении комплексом FRA, крайне затруднительно. Вероятность ошибочного диагноза, поставленного по результатам анализа АЧХ, достаточно высока.

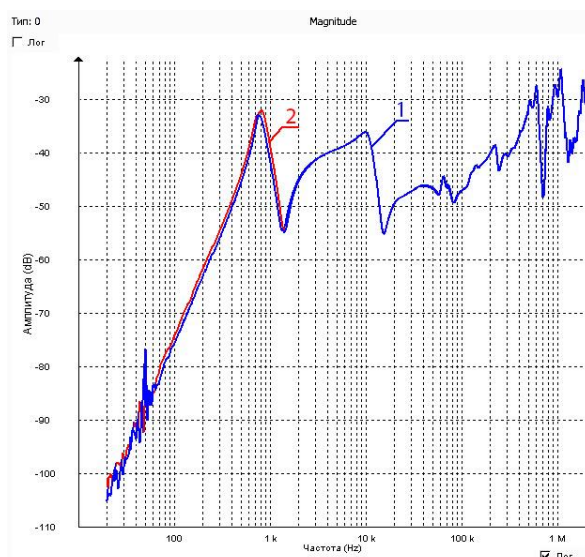


Рис. 14. Зондирующий импульс подается на обмотку фазы В, сигнал отклика регистрируется на фазе с
Fig. 14. Probing impulse is applied to the winding of phase B, response is measured at the phase c

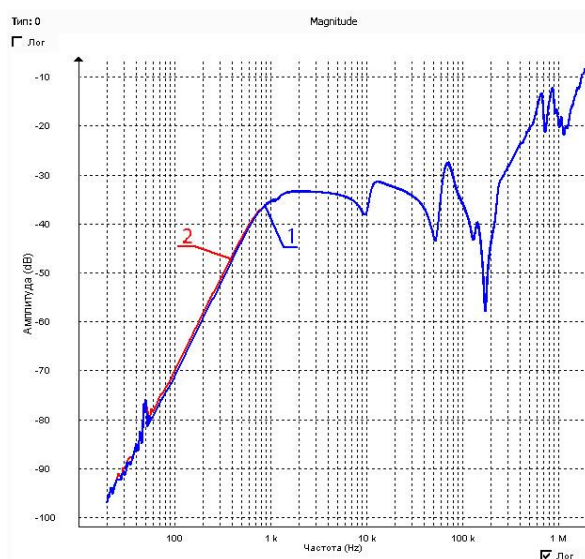


Рис. 15. Зондирующий импульс подается на обмотку фазы С, сигнал отклика регистрируется на фазе с
Fig. 15. Probing impulse is applied to the winding of phase C, response is measured at the phase c

На основании результатов исследований можно сделать вывод о том, что метод наносекундных импульсов и метод FRA примерно с одинаковой чувствительностью реагируют на межвитковые замыкания, но первый более чувствителен в отношении смещения витков в высоковольтной обмотке трансформатора. Так, метод наносекундных импульсов позволяет обнаруживать смещение 14 витков высоко-

вольтной обмотки, тогда как методом FRA такой дефект выявить не удалось.

Таким образом, есть все основания заключить, что эффективность контроля состояния обмоток оказывается как минимум не хуже, а в ряде случаев выше технологии FRA. Объяснение состоит в том, что зондирующий импульс наносекундной длительности с коротким фронтом прямоугольной формы насыщен высокочастотной составляющей в диапазоне сотни кГц вплоть до десятков МГц. Более высокая граница частотного диапазона обеспечивает более высокую интенсивность переходного процесса по сравнению с методом FRA, предел частотного диапазона которого ограничивается значением 1–2 МГц.

Выводы по результатам исследования

Разработан диагностический комплекс для контроля состояния обмоток трансформаторов, реализованный на основе генератора зондирующих импульсов по схеме Ю.В. Введенского, который позволяет формировать импульс длительностью в диапазоне 60–500 нс с фронтом 25 нс на нагрузке с произвольным импедансом.

Показано, что при импульсном методе дефектографирования состояния обмоток трансформатора для обнаружения смещения витков обмотки и короткого замыкания витков высокая чувствительность достигается при длительности импульса 60–500 нс с фронтом 15–20 нс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов В.В. Ранжирование состаренного парка силовых трансформаторов по техническому состоянию // Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 26–28 сентября, 2006. – С. 7–18.
2. Pettersson L., Fantana N.L., Sunderman U. Assessment ranking of power transformers using condition based evaluation, a new approach // CIGRE Paris Conference. – Paris, France, 1998. – Paper 12–204.
3. Осотов В.Н. О методологии оценки состояния электрооборудования с большим сроком службы // Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 26–28 сентября, 2006. – С. 25–29.
4. Вдовико В.П. Диагностика высоковольтного электрооборудования и эффективность ее применения // Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 26–28 сентября, 2006. – С. 34–41.
5. Лех В., Тымински Л. Новый метод индикации повреждений при испытании трансформаторов на динамическую прочность // Электричество. – 1966. – Т. 1. – № 1. – С. 77–81.
6. Аветиков Г.В., Левицкая Е.И., Попов Е.А. Импульсное дефектографирование трансформаторов на при испытаниях на электродинамическую стойкость // Электротехника. – 1978. – № 4. – С. 53–57.
7. Конов Ю.С., Короленко В.В., Федорова В.П. Обнаружение повреждений трансформаторов при коротких замыканиях // Электрические станции. – 1980. – № 7. – С. 46–48.
8. Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов / С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // Электротехника. – 1990. – № 5. – С. 75–76.
9. Диагностика обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов / С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // Электротехника. – 1991. – № 12. – С. 30–35.

Экспериментально доказано, что технология импульсного дефектографирования механического состояния обмоток трансформаторов зондирующими импульсами наносекундной длительности обладает более высокой чувствительностью к обнаружению смещений обмоток трансформаторов в радиальном и аксиальном направлениях по сравнению с методом частотного анализа.

Заключение

Развитие дефектов обмоток происходит неконтролируемо и в результате заканчивается выходом трансформатора из строя. Возможность контролировать дефекты на ранней стадии развития как механического, так и электрического типа, обеспечивая своевременный вывод трансформаторного оборудования в ремонт, является одной из основных задач стоящих перед энергосистемами РФ. Не смотря на множество положительных сторон и рекомендаций СИПЭ, результаты экспериментов, представленных в статье, подтверждают факт, что комплекс FRAX далеко не всегда оказывается в должной степени эффективным. Реальной альтернативой технологии FRA может оказаться диагностический комплекс, в основе работы которого лежит контроль состояния обмоток зондирующими импульсами наносекундной длительности. Эксперименты, выполненные на реальном трансформаторе, подтвердили перспективность этого подхода.

10. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самараэнерго методом низковольтных импульсов // Электрические станции. – 2003. – № 11. – С. 49–51.
11. Хренников А.Ю. Опыт обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов // Энергетик. – 2003. – № 7. – С. 18–20.
12. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization / D. Guillen, J. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, D. Granados-Lieberman, E. Barocio // Measurement. – 2019. – V. 141. – P. 24–36.
13. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies / X. Zhao, C. Yao, A. Abu-Siadab, R. Liaoa // Electrical Power and Energy Systems. – 2019. – V. 111. – P. 351–368.
14. Diagnostic of transformer winding deformation fault types using continuous wavelet transform of pulse response / Q. Cheng, Z. Zhao, C. Tang, G. Qian, S. Islam // Measurement. – 2019. – V. 140. – P. 197–206.
15. Velasquez R., Lara J., Melgar A. Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers // Engineering Failure Analysis. – 2019. – V. 101. – P. 215–229.
16. Zarkovi M., Stojkovi Z. Analysis of artificial intelligence expert systems for powertransformer condition monitoring and diagnostics // Electric Power Systems Research. – 2017. – V. 149. – P. 125–136.
17. Senobari R., Sadeh J., Borsi H. Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: a review // Electric Power Systems Research. – 2019. – V. 155. – P. 172–183.
18. Investigating the applicability of the finite integration technique for studying the frequency response of the transformer winding / P. Hillenbrand, S. Tenbohlen, M. Samimi, A. Shayegani, A. Mohseni, J. Faiz // Electrical Power and Energy Systems. – 2019. – V. 110. – P. 411–418.
19. Брошюра СИПЭ № 342. Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA), WG A2.26, 2008.
20. Ларин В.С. Анализ частотных характеристик для локализации коротких замыканий в обмотках трансформаторов // Электричество – 2018. – № 4. – С. 14–25.

21. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2012. – V. 4. – № 4. – P. 149–153.
22. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Advanced control state technology of transformer windings // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2013. – V. 5. – № 4. – P. 94–98.
23. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2014. – V. 6. – № 1. – P. 145–147.
24. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse // IEEE Translation on Dielectric Electrical Insulation – 2015. – V. 22. – № 4. – P. 2041–2045.

Поступила 15.10.2020 г.

Информация об авторах

Лавринович А.В., инженер 1 категории, отдел по высоковольтному оборудованию, Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа.

Мытников А.В., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.314.21.027.3.045:681.518.54

DIAGNOSTICS FACILITY FOR EFFECTIVE CONTROL OF WINDING CONDITION OF HIGH VOLTAGE TRANSFORMERS

Alexey V. Lavrinovich¹,
lavrinovich86@yandex.ru

Alexey V. Mytnikov²,
mytnikov66@mail.ru

¹ Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas,
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

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

The importance of the research is driven by the fact that all stages of production and processing of geological resources include a large-scale technological complex, in which the dominant role is played by electric power systems that ensure the operation of all the main components and assemblies. A significant class of high-voltage equipment of such systems is distribution power transformers and shunt reactors. Failure of transformer equipment causes a rapid shutdown of the technological cycle, an emergency and financial losses. This can be avoided by ensuring the reliable operation of electrical equipment by conducting quality diagnostics to assess the residual life of a transformer or reactor. Standard technologies, such as measurements of direct current resistance, absorption coefficient and dielectric loss tangent do not allow detecting a winding defect at an early stage of development, and therefore cannot be considered effective. In almost all world energy systems, the FRA technological complex is considered to be promising and recommended for use, which is a technical implementation of the method of analyzing frequency characteristics. However, this technology encounters difficulties of a technical and organizational nature when implemented in Russian energy systems. The instrument base and software do not always meet the requirements and standards for testing electrical equipment of the grids of the Russian Federation. As a result, there are a high percentage of bad conclusions about the results of monitoring. The issue is complicated due to the fact that the patent for the use of FRA technology belongs to the institutes of the USA, Canada and several European countries. Taking into account the unfriendly political situation, a number of sanctions and restrictions on the export of machinery and technologies, further use of FRA technology may be problematic. Modern technology corresponding to the requirements does not exist in the Russian Federation. In this regard, the development of a reliable diagnostic complex that takes into account the technical, climatic and other features of the electric power systems of the Russian Federation and allows effective monitoring of the state of the windings taking into account the specifics of domestic transformer equipment is an urgent task.

The main goal of the work is to research the effectiveness of the diagnostic complex based on probing pulses of nanosecond duration on real transformer equipment. To conduct a comparative analysis of the results, monitoring the status of the transformer windings of the developed complex and the FRA technological complex.

Object of the research is real transformer TM-160/10, fails such as short-circuited turns and mechanical displacement of the windings were created.

Methods: experimental measurements of probing pulses and response in both technologies – pulsed and FRA. Comparison of condition control efficiency for both methods. Using Tektronix electronic oscilloscopes of the TDS-1012 type, a probe and a response pulse were recorded. The measurements were carried out for the same defective states of the winding using the FRA complex.

Results. On a real transformer, the efficiency of the developed diagnostic complex for monitoring the status of transformer windings based on nanosecond probe pulses was experimentally studied. It is shown that the efficiency of monitoring the status of transformer windings with the help of the developed complex is no worse, and in some cases exceeds the efficiency of the FRA complex.

Key words:

Winding condition control, pulsed method, probing impulse, winding fail, control efficiency.

REFERENCES

1. Sokolov V.V. Ranzhirovanie sostarennoy parka silovyykh transformatorov po tekhnicheskoy sostoyaniyu [Ranking of the aged power transformer park due to technical condition]. *Sovremennoe sostoyanie i problem diagnostiki silovogo elektrooborudovaniya. Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern condition and problems of power electrical equipment diagnostics. Proc. of IV All-Russian scientific conference]. Novosibirsk, Russia, 2006. pp. 7–18.
2. Pettersson L., Fantana N.L., Sunderman U. Assessment ranking of power transformers using condition based evaluation, a new approach. *CIGRE Paris Conference*. Paris, France, 1998. Paper 12-204.
3. Osotov V.N. O metodologii oschenki sostoyaniya elektrooborudovaniya s bolshim srokom sluzhby [About methodology of electrical equipment estimation with large term in service]. *Sovremennoe sostoyanie i problem diagnostiki silovogo elektrooborudovaniya. Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern condition and problems of power electrical equipment diagnostics. Proc. of IV All-Russian scientific conference]. Novosibirsk, Russia, 2006. pp. 25–29.
4. Vdoviko V.P. Diagnostika vysokovoltного elektrooborudovaniya I effektivnost ee primeneniya [Diagnostics of high voltage equipment and effectiveness of its application]. *Sovremennoe sostoyanie i problem diagnostiki silovogo elektrooborudovaniya. Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern condition and problems of power electrical equipment diagnostics. Proc. of IV All-Russian scientific conference]. Novosibirsk, Russia, 2006. pp. 34–41.
5. Lekh V., Tyminskiy L. New method of fail diagnostics at the dynamic reliability transformer test. *Electricity*, 1966, vol. 1, no. 1, pp. 77–81. In Rus.
6. Avetnikov G.V., Levitskaya E.I., Popov E.A. Impulsed defectography of transformers at the electrodynamic reliability test. *Electrotechnic*, 1978, no. 4, pp. 53–57. In Rus.
7. Konov Yu.S., Korolenko V.V., Fedorova V.P. Fail detection of transformers due to short circuit. *Electric Power Stations*, 1980, no. 7, pp. 46–48. In Rus.

8. Alikin S.V., Drobyscevskiy A.A., Levitschaya E.I., Filatova M.A. Quantitative assessment of the of pulse defectography results of power transformer windings. *Electrotechnic*, 1990, no. 5, pp. 75–76. In Rus.
9. Alikin S.V., Drobyscevskiy A.A., Levitschaya E.I., Filatova M.A. Power transformer winding diagnostics by low-voltage pulsed method. *Electrotechnic*, 1991, no. 12, pp. 30–35. In Rus.
10. Khrennikov A.Yu., Kikov O.M. Power transformer diagnostics by low-voltage pulsed method in Samaropenergo. *Electric Power Stations*, 2003, no. 11, pp. 49–51. In Rus.
11. Khrennikov A.Yu. Experience of mechanical deformation detection of power transformer windings. *Energetic*, 2003, no. 7, pp. 18–20. In Rus.
12. Guillen D., Olivares-Galvan J., Escarela-Perez R., Granados-Lieberman D., Barocio E. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization. *Measurement*, 2019, vol. 141, pp. 24–36.
13. Zhao X., Yao C., Abu-Siadab A., Liaoa R. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies. *Electrical Power and Energy Systems*, 2019, vol. 111, pp. 351–368.
14. Cheng Q., Zhao Z., Tang C., Qian G., Islam S. Diagnostic of transformer winding deformation fault types using continuous wavelet transform of pulse response. *Measurement*, 2019, vol. 140, pp. 197–206.
15. Velasquez R., Lara J., Melgar A. Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers. *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 101, pp. 215–229.
16. Zarkovi M., Stojkovi Z. Analysis of artificial intelligence expert systems for powertransformer condition monitoring and diagnostics. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 149, pp. 125–136.
17. Senobari R., Sadeh J., Borsi H. Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: a review. *Electric Power Systems Research*, 2019, vol. 155, pp. 172–183.
18. Hillenbrand P., Tenbohlen S., Samimi M., Shayegani A., Mohseni A., Faiz J. Investigating the applicability of the finite integration technique for studying the frequency response of the transformer winding. *Electrical Power and Energy Systems*, 2019, vol. 110, pp. 411–418.
19. Brochure of SIGRE № 342. *Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)*, WG A2.26, 2008.
20. Larin V.S. Frequent characteristic analysis for short circuit location in transformer windings. *Electricity*, 2018, no. 4, pp. 14–25. In Rus.
21. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 149–153.
22. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Advanced control state technology of transformer windings. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 94–98.
23. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 145–147.
24. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse. *IEEE Translation on Dielectric Electrical Insulation*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 2041–2045.

Received: 15 October 2020.

Information about the authors

Alexey V. Lavrinovich, engineer of first category, Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas.

Alexey V. Mytnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.493:550.42

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ГЕРМАНИЯ И ВОЛЬФРАМА В ГЕРМАНИЙ-УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СПЕЦУГЛИ (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК)

Арбузов Сергей Иванович¹,
siarbuzov@mail.ru

Ильенок Сергей Сергеевич¹,
ilenokss@tpu.ru

Чекрыжов Игорь Юрьевич²,
chekr2004@mail.ru

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

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки форм нахождения германия и других попутных элементов примесей в германий-угольных месторождениях.

Цель: изучить формы нахождения германия и вольфрама в металлоносных углях месторождения Спецугли (Дальний Восток).

Объекты: угли и углистые алевролиты германий-угольного месторождения.

Методы: корреляционный анализ, изучение группового состава бурого угля, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, инструментальный нейтронно-активационный анализ, сканирующая электронная микроскопия.

Результаты. Изучены основные формы нахождения германия и вольфрама в углях месторождения Спецугли. В высокогерманиевых углях месторождения Спецугли германий характеризуется разнообразными формами нахождения. Наряду с преобладающей германий-органической формой, значительную роль играют минеральные фазы. Установлено, что значение минеральных форм нахождения в концентрировании германия в высокогерманиевых углях значительно выше, чем предполагалось ранее. В угольных пластах, особенно отчетливо вблизи коры выветривания по грейзенизированным гранитам, широко распространены различные германийсодержащие минеральные фазы микронной и нанометровой размерности. В углях выявлены алюмосиликатная (силикатная) форма германия, разнообразные железистые (гидрогётит, гётит, ярозит) и полиминеральные фазы. Алюмосиликатная (силикатная) фаза представлена пленкоподобными агрегатами, содержащими 0,15–0,4 % германия. В железистых минеральных агрегатах содержится от 0,1 до 6,2 % германия. Аномальные содержания германия совместно с вольфрамом и мышьяком установлены в железомарганцевых корках – продуктах выветривания грейзенизированных гранитов фундамента, сформировавшихся в условиях палеоболота. Наличие вторичных минеральных фаз германия в углях, развитых по диагенетическим минералам, позволяет предполагать, что формирование германиевой минерализации в месторождении может быть полихронным и не ограничивается торфяной стадией. Для вольфрама выявлена преимущественно органическая форма нахождения. Роль минеральных форм вольфрама в общем его балансе в углях месторождения Спецугли незначительна. В изученных 9 пробах угля выявлено всего 1 зерно шеелита. Вблизи коры выветривания вольфрам в углях также встречается в качестве примеси в железомарганцевых «корках». Эти данные согласуются с результатами анализа распределения вольфрама по фракциям группового состава. После извлечения гумусовых кислот в щелочную вытяжку переходит в среднем 99 % вольфрама. При этом в щелочной вытяжке около половины его связано с гуминовыми кислотами, а остальная часть – с низкомолекулярными органическими кислотами.

Ключевые слова:

Германий-угольное месторождение, уголь, формы нахождения, германий, вольфрам, органические формы, микроминеральные фазы.

Введение

Формы нахождения химических элементов являются важным показателем условий образования углей, природы формирования в них геохимических аномалий, важным фактором, определяющим рентабельность и технологию извлечения ценных элементов-примесей из углей и углеотходов. Проблема заключается не только в сложности распознавания отдельных форм нахождения элементов, но и в необходимости оценки соотношения (баланса) разных форм в конкретных типах угля.

Месторождение Спецугли – одно из крупнейших германий-угольных месторождений мира [1, 2]. Согласно опубликованным данным, в результате промышленной отработки германиевых углей месторождения Спецугли в 2017 г. по традиционной техно-

логии, включающей стадию получения обогащенной металлом золы уноса, коэффициент извлечения составил 28,74 % [3]. Соответственно, технологические потери германия при сжигании угля составили 71,26 %, в том числе со шлаками – 67,13 %. Такие большие потери при используемой технологии получения промышленного концентрата помимо других причин могут быть обусловлены недостаточной оценкой баланса минеральной и органической форм нахождения германия, которые во многом определяют подвижность германия в процессе сжигания угля и концентрирование его в золе уноса. Современная аналитическая техника высокого разрешения позволяет более достоверно оценить соотношение минеральных и неминеральных форм нахождения германия и других сопутствующих элементов в углях.

Многочисленными исследованиями доказано и традиционно считается, что германий в углях сконцентрирован в основном в органическом веществе. Доля неорганических форм незначительна, в основном в пределах 2–3 % [4], и в целом не превышает 10–20 % [5]. Современные данные показывают, что в германиеносных бурых углях соотношение органической и минеральной форм германия может существенно варьировать. Согласно результатам исследований германий-угольного месторождения Спецугли [6], сделан вывод, что с минеральной фазой может быть связано до 25–30 % германия в месторождении. При этом, не менее 60 % германия в нем связано с мобильным органическим веществом, в том числе от 25 до 60 % приходится на комплексные соединения германия с гуминовыми кислотами, и 8–39 % связано с низкомолекулярной фрак-

цией органического вещества, не осаждаемой кислотами. В.И. Вялов и др. [7], используя методику ICP MS с лазерной абляцией, впервые наглядно показали, что основным носителем германия в углях этого месторождения является Δ -витринит.

Вольфрам является традиционным спутником германия в германий-угольных месторождениях [8, 1]. Формы его нахождения в углях в целом исследованы в существенно меньшей степени, чем формы германия, а в месторождении Спецугли не изучены совсем.

Цель данной работы – выяснение основных форм нахождения германия и сопутствующего вольфрама с использованием современных аналитических методов и высокоразрешающей сканирующей электронной микроскопии и оценка соотношения этих форм в наиболее обогащенных германием углях месторождения Спецугли.

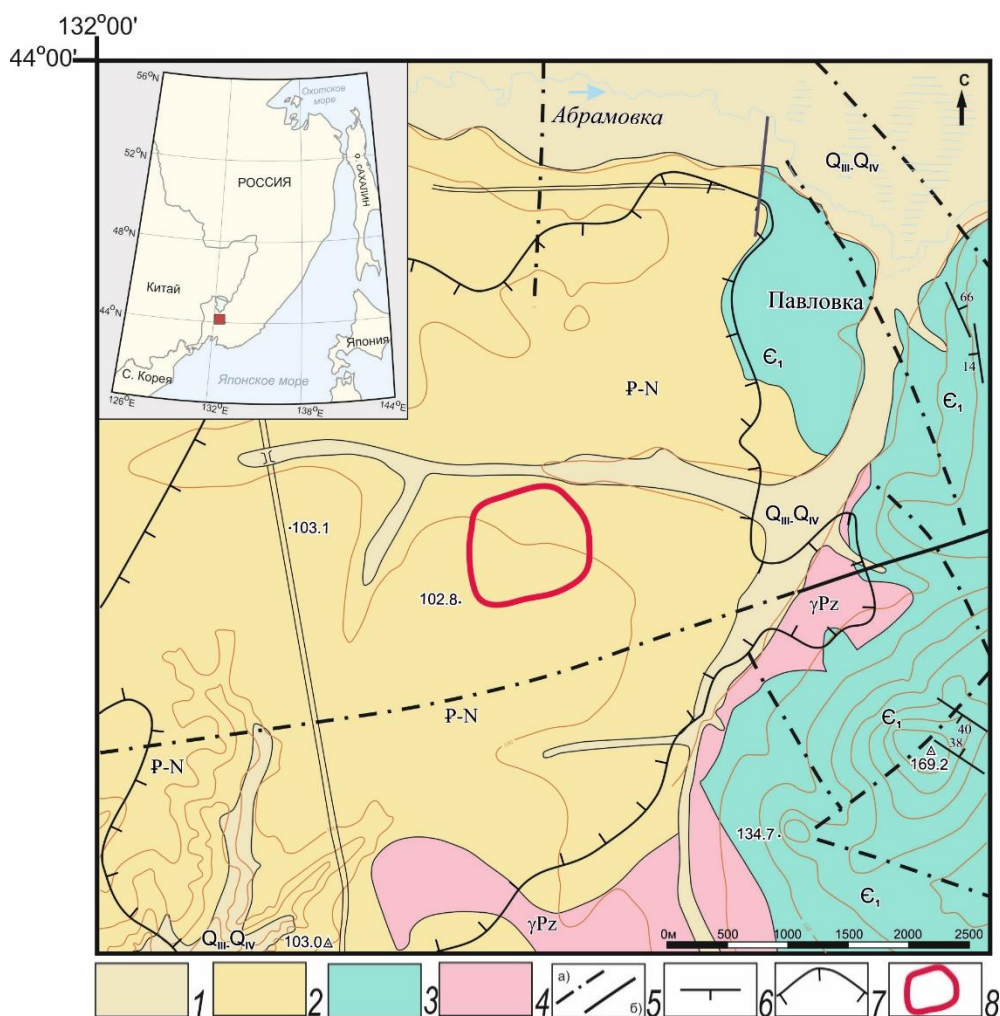


Рис. 1. Схема размещения месторождения Спецугли на территории Дальнего Востока и геологическая карта района расположения месторождения: 1 – четвертичные аллювиальные отложения (пески, галечники); 2 – палеоген-неогеновые песчано-галечниковые (неоген) и угленосные отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты и угли) (палеоген); 3 – позднекембрийские отложения (сланцы серицитовые, кварц-серицитовые, углеродистые, алевролиты, линзы известняков); 4 – палеозойские граниты; 5 – разломы: а) предполагаемые, б) установленные; 6 – элементы залегания; 7 – граница угленосных отложений Павловской впадины; 8 – месторождение германия Спецугли

Fig. 1. Scheme of location of the Spetsugli deposit in Russian Far East and geological map of the deposit location area: 1 – Quaternary alluvial sediments (sand, gravel); 2 – Paleogene-Neogene sand-gravel (Neogene) and coal sediments (sandstone, siltstone, argillite, and coal) (Paleogene); 3 – Late Cambrian sediments (sericitic, quartz-sericitic, and carboniferous shales, siltstone, limestone lens); 4 – Paleozoic granites; 5 – faults: a) supposed, b) determined; 6 – strike and dip; 7 – boundary of coal-bearing deposits of the Pavlovsk depression; 8 – germanium deposit Spetsugli

Объекты исследования

Месторождение германия Спецугли расположено на юго-западной окраине Ханкайского массива, в восточной части Павловской впадины (рис. 1), в одной из депрессий, составляющих Павловское угольное поле [9]. Особенности геологического строения месторождения германия Спецугли в пределах Павловского бурогоугольного месторождения достаточно подробно описаны в многочисленных работах [1, 7, 10, 11].

Высокие содержания германия приурочены к локальному поднятию гранитного фундамента с прилегающими и перекрывающими его четырьмя рудоносными угольными пластами (I, II нижний, II верхний, III нижний) павловской свиты эоцено-олигоценного возраста с общей мощностью угленосных отложений до 100 м. Угленосные отложения представлены серыми и коричневатато-серыми слабо-литифицированными аргиллитами, алевролитами и песчаниками с линзами и горизонтами галечников.

Угли месторождения бурые подгруппы 2БВ, среднесольные (16–18 %), малосернистые (0,4–0,5 %), с теплотой сгорания «рабочего» топлива 12,0–12,5 МДж/кг [10]. Микроструктура угля фрагментарная, атритово-фрагментарная. В исходном растительном материале углей преобладают остатки стеблевой древесины, в меньшем количестве коровые ткани и остатки листовой паренхимы. Мацеральный состав характеризуется высоким содержанием витринита от 80 до 99 %, представленным главным образом атритом и фрагментами структурного и слабо структурированного витринита, остатками древесины, листовой паренхимы и коровой ткани [3]. Угленосная толща с разрывом и угловым несогласием перекрыта неогеновыми рыхлыми аллювиальными отложениями. Выше залегает горизонт глин четвертичного возраста.

Месторождение германия представляет собой субизометричный по контуру блок площадью около 1 км². Максимальный по площади контур распространения промышленной германиеносности был установлен в нижнем (I) наиболее мощном угольном пласте и подстилающих его углистых аргиллитах. Контур уменьшается к верхним пластам II и III групп, образуя «этажное» строение месторождения. В вертикальном разрезе для рудоносных пластов при общем уменьшении снизу вверх промышленной значимости каждого из них в этом же направлении возрастают средние содержания германия в пластах [10]. Согласно другим данным [3, 11], соотношение обратное: вверх по разрезу среднее содержание в пластах снижается. Кроме германия в угольных пластах установлены высокие концентрации вольфрама, бериллия и сурьмы.

Для изучения форм нахождения германия и вольфрама в настоящей работе опробованы маломощные пласты верхней группы (рис. 2).

Опробование выполнено в пределах угледобывающего разреза как в контуре промышленного германиевого оруденения, так и вне его. Всего отобрано 36 проб угля и 28 проб углевмещающих пород. Все пробы исследованы на германий и комплекс элементов-

спутников. Две пробы угля с высокими содержаниями использованы для анализа группового состава и 9 проб – для электронно-микроскопического анализа (табл. 1).

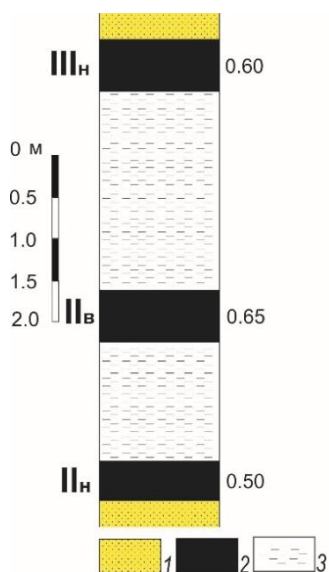


Рис. 2. Схема размещения опробованных угольных пластов в угленосном разрезе: 1 – песчаник, 2 – уголь, 3 – алевролит

Fig. 2. Scheme of location of the sampled coal seams in the coal-bearing section: 1 – sandstone, 2 – coal, 3 – siltstone

Таблица 1. Характеристика проб угля месторождения Спецугли для исследования группового состава и электронно-микроскопических исследований

Table 1. Characteristics of the coal samples from the Spetsugli deposit for the research of the phase composition and electron-microscopic studies

Шифр пробы Sample code	Состав пробы, Sample composition	Угольный пласт Coal seam	Зольность (A ^d), % Ash, %	Содержание элементов, г/т Element content, ppm	
				Ge	W
СУ-56-18	Уголь бурый Brown coal	III нижний III nizhny	9,5	1600	563
СУ-103-19	Уголь бурый Brown coal	II нижний II nizhny	26,5	2540	417
СУ-6-18	Углистый алевролит Coal siltstone	II нижний II nizhny	86,5	377	68
СУ-7-18	Углистый алевролит Coal siltstone	II нижний II nizhny	67,8	844	218
СУ-9-18	Угольное включение Coal inclusion	между I и II пластом between seams I and II	10,9	5306	489
СУ-51-18	Уголь бурый Brown coal	II нижний II nizhny	35,9	2328	391
СУ-54-18	Углистый алевролит Coal siltstone	II нижний II nizhny	77,9	435	151
СУ-104-19	Уголь бурый Brown coal	II нижний II nizhny	35,1	1933	365
1416	Уголь бурый Brown coal	II нижний II nizhny	33,8	1416	833

Методика исследования

Формы нахождения германия и вольфрама исследовались с применением комплекса методов, включающих как прямые методы их определения, так и косвенные методы оценки. Выбранный комплекс методов хорошо зарекомендовал себя при изучении форм нахождения в углях и торфах редкоземельных элементов, U, Li, Ga и других элементов-примесей [12–14].

На первом этапе для предварительной оценки связи германия с органическим веществом выполнено исследование представительной выборки германиевых углей методами математической статистики (90 проб). Для расчета использованы, помимо собственных результатов, опубликованные данные [3, 15]. Анализ выполнен методом ранговой корреляции Спирмена–Кендала, так как парная корреляция при такой большой неоднородности выборки может дать недостоверные результаты. Задача исследований – оценить связь содержания германия в углях и золе угля с зольностью и выявить основные геохимические ассоциации элементов-спутников германия и вольфрама.

Для исследования роли органического и минерального вещества в концентрировании Ge и W использованы стандартные методики разделения бурого угля на групповые составляющие. Сущность метода заключается в последовательном выделении из воздушно-сухого угля битумов, гуминовых кислот и остаточного угля. Извлечение гуминовых веществ из бурых углей выполнено в соответствии с ГОСТ 9517-94 [16], а битумов – по ГОСТ 10969-91 [17]. Битумы (B^{daf}) экстрагировались кипящим бензолом в аппарате Грефе в течение 4 часов. Бензол отгонялся, а остаток высушивали при температуре 70 °С до постоянной массы. Определение выхода общих гуминовых кислот ($GK_{об}^{daf}$) выполнялось путем обработки воздушно-сухого остатка после извлечения битумов щелочным раствором пиродифосфата натрия на встряхивателе в течение одного часа, последующей экстракцией пробы 1 % раствором NaOH на кипящей водяной бане в течение 2 часов, осаждением гуминовых кислот избытком 5 % HCl и определением массы гуминовых кислот. Выход свободных гуминовых кислот ($GK_{св}^{daf}$) определялся таким же способом, только исключалась стадия обработки пиродифосфатом натрия, которая необходима для разрушения связанных в виде солей гуминовых кислот. Остатки после извлечения гуминовых кислот (OY^{daf}) промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции, высушивали до воздушно-сухого состояния и рассчитывали выход на сухое беззольное топливо. Разницу от 100 % за вычетом битумов, гуминовых кислот и остаточного угля интерпретировали как сумму низкомолекулярных органических кислот и потери.

Во всех групповых составляющих бурого угля исследованы содержания комплекса химических элементов и выполнены балансовые расчеты. Выделенные фракции изучались 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). Пробоподготовка велась методом химического разложения с целью избежать потерь элементов в процессе озоления. Содержание вольфрама во фракциях контролировалось также методом ИНАА. Анализ выполнен в ядерно-геохимической лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ (г. Томск).

Всего изучен групповой состав 2 проб бурого угля с аномально высоким содержанием германия (более 0,16 % в угле) и вольфрама (более 400 г/т в угле и 0,5 % в золе угля) (табл. 1)

Минеральные формы нахождения германия и вольфрама в пробах угля и золы угля изучались в МИНОЦ «Урановая геология» отделения геологии ТПУ 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. Исследованы не только минеральные фазы, но и содержание элементов-примесей в органическом веществе. Исследовано 9 образцов с разным содержанием германия и вольфрама. Выполнено также исследование фракций группового состава. Для косвенной оценки возможных форм нахождения Ge и W во фракциях группового состава исследованы также золы фракций. Озоление проведено при температуре 800 ± 15 °С.

Выбранный комплекс аналитических методов позволяет с высокой надежностью оценить формы нахождения и условия концентрирования вольфрама и германия в углях.

Результаты исследования

Аномально высокое содержание в углях месторождения Спецугли германия, вольфрама и других сопутствующих элементов предполагает наличие фаз-концентраторов этих элементов. Это может быть как минеральное, так и органическое вещество. Если для германия давно определена ведущая роль органического вещества в его концентрировании в углях, для вольфрама такая информация не представительна и весьма противоречива.

Большие потери германия при отработке месторождения по традиционной технологической схеме, включающей стадию получения обогащенной металлом золы уноса [3], могут указывать на значительную роль неорганической формы его нахождения в угле.

Результаты корреляционного анализа

Корреляционный анализ, выполненный методом ранговой корреляции Спирмена и Кендала для 90 проб угля месторождения Спецугли, показал отсутствие значимой корреляционной связи содержания германия в угле с зольностью ($кк = -0,10$) и значимую отрицательную связь содержания вольфрама с зольностью ($кк = -0,53$). В золе угля Ge характеризуется хотя и невысокой, но значимой отрицательной связью с зольностью ($кк = -0,33$), а вольфрам – сильной значимой отрицательной связью ($кк = -0,84$). Парная кор-

реляция также показала слабую отрицательную связь германия с зольностью в угле и значимую отрицательную связь в золе угля. Для вольфрама имеет место отрицательная значимая связь его содержания с зольностью как в угле, так и в золе угля.

Это свидетельствует о накоплении повышенных концентраций Ge и W в углях из водных растворов, а не в форме кластогенных минеральных образований, и о незначительном вкладе кластогенного материала в общий баланс элементов в германийносных углях. Причем если для вольфрама видна отчетливая связь с органическим веществом, то для германия она более сложная. Очевидно, что для германия простая зависимость: содержание германия – зольность, осложне-

на еще какими-то факторами. Это может быть либо сорбционный оптимум, определяющий наиболее благоприятные условия для сорбционного его накопления при определенной зольности [5], либо наличие форм нахождения германия, не связанных с органическим веществом. Возможно также влияние обоих факторов. Характер распределения германия в угле в зависимости от зольности (рис. 3, а) показывает сорбционную природу его накопления в угле и важную роль «сорбционного оптимума» в его концентрировании. Несмотря на специфику корреляционных связей, график зависимости содержания германия в золе от зольности (рис. 3, б) указывает на важную роль органического вещества в его накоплении.

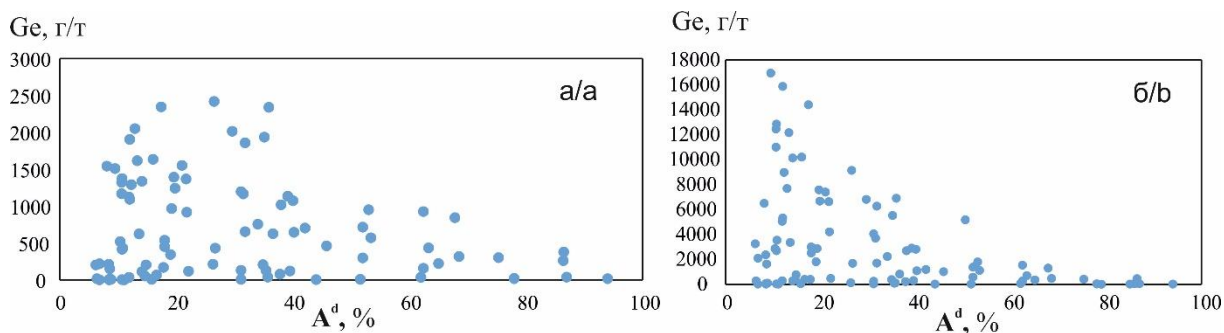


Рис. 3. Зависимость содержания германия в угле и углистом алевролите (а) и в их золе (б) от зольности

Fig. 3. Dependence of Ge content in the coal and coal siltstones (a) and their ash (b) on the ash yield

Следовательно, корреляционный анализ свидетельствует о преобладающей роли органического вещества в концентрировании вольфрама и о наличии нескольких форм концентрирования германия в углях. Вместе с тем корреляционный анализ не позволяет выполнить расчет баланса соотношения органической и минеральной форм нахождения элементов в углях в настоящее время. Эти данные позволяют лишь предположить основной путь поступления элементов в торфяную залежь (угольный пласт) и оценить возможные механизмы их накопления в углях.

Исследование группового состава угля

Оценку роли органического и минерального вещества в концентрировании металлов в угле обычно осуществляют на основании данных анализа фракций угля различной плотности и с помощью уравнений связи (уравнений регрессии) содержания металла в угле и золе угля с зольностью [4]. Этот метод не позволяет учесть долю аутигенных микро- и наноминеральных фаз элементов, сформировавшихся в процессе углефикации. Более надежным методом установления такой взаимосвязи является исследование группового состава угля с последующими балансировочными расчетами.

В табл. 2, 3 приведены результаты распределения германия и вольфрама по фракциям группового состава угля. Изучены пробы с аномально высокими содержаниями этих элементов. В первом случае речь идет о пробе с содержанием 0,16 % Ge и 0,056 % W, во втором – 0,25 % Ge и 0,042 % W.

Таблица 2. Выход германия во фракции группового состава бурого угля

Table 2. Ge yield in the phases of brown coal

Групповой состав угля Coal phases	Выход фракций, % Phase yield, %	Содержание Ge, г/т Ge content, ppm	Выход Ge во фракции, % Ge yield into phases, %
СУ-56-18			
Исходный уголь Initial coal	100	1600	100
Спирто-толуольный экстракт (битум) Alcohol-toluene extract (bitumen)	1,3	<2,0	<0,1
Свободные гуминовые кислоты Free humic acids	10,7	4150*	27,0
Регенерированные гуминовые кислоты Recovered humic acids	2,5	12430*	20,0
Остаточный уголь Residual coal	85,5	1000	53,0
СУ-103-19			
Исходный уголь Initial coal	100	2540	100
Спирто-толуольный экстракт (битум) Alcohol-toluene extract (bitumen)	1,1	<2,0	<0,1
Свободные гуминовые кислоты Free humic acids	24,4	6110*	59,3
Регенерированные гуминовые кислоты Recovered humic acids	5,6	7940*	17,7
Остаточный уголь Residual coal	68,9	840	23,0

Примечание: * – получено расчетным путем.

Note: * – obtained by calculation.

Таблица 3. Выход вольфрама во фракции группового состава бурого угля

Table 3. W yield in the phases of brown coal

Групповой состав угля Coal phases	Выход фракций, % Phase yield, %	Содержание W, г/т W content, ppm	Выход W во фракции, % W yield into phases, %
СУ-56-18			
Исходный уголь Initial coal	100	563	100
Спирто-толуольный экстракт (битум) Alcohol-toluene extract (bitumen)	1,3	<2,0	<0,1
Свободные гуминовые кислоты Free humic acids	10,7	5226*	99,3
Регенерированные гуминовые кислоты Recovered humic acids	2,5	58*	0,3
Остаточный уголь Residual coal	85,5	3,1	0,5
СУ-103-19			
Исходный уголь Initial coal	100	417	100
Спирто-толуольный экстракт (битум) Alcohol-toluene extract (bitumen)	1,1	<2,0	<0,1
Свободные гуминовые кислоты Free humic acids	24,4	1655*	97,9
Регенерированные гуминовые кислоты Recovered humic acids	5,6	36,7*	0,5
Остаточный уголь Residual coal	68,9	9,6	1,6

Примечание: * – получено расчетным путем.
Note: * – obtained by calculation.

Как следует из этих данных, значительная доля германия – от 47 до 77 %, и более 98 % вольфрама переходит в щелочную вытяжку. При этом вольфрам практически весь извлекается 1 % NaOH во фракцию, получившую название свободных гуминовых кислот. Использование пирофосфата натрия лишь незначительно увеличивает выход вольфрама в щелочную вытяжку, что свидетельствует о его преимущественном концентрировании в мобильных органических веществах. В эту вытяжку входят собственно гуминовые кислоты, фульвокислоты и другие низкомолекулярные кислоты. Вероятно, сюда же могут переходить и ионные формы элемента, не связанные с органическим веществом. Оценить роль каждой из них достаточно сложно, но приближенные оценки показывают, что основная часть вольфрама, извлекаемая в щелочную вытяжку, не осаждается с гуминовыми кислотами в процессе ее подкисления 5 % HCl, а остается в растворе. Приблизительное соотношение можно оценить по данным табл. 4.

При этом следует понимать, что прямое определение вольфрама в гуминовых кислотах несколько занижено по сравнению с его содержанием в этих веществах в исходном угле, так как в процессе экстракции их из исходного угля они насыщаются избытком натрия, который не извлекается полностью при по-

следующем промывании извлеченных твердых гуминовых кислот дистиллированной водой. Кроме того, возможно частичное разрушение первичных микроминеральных фаз вольфрама нагретым раствором 1 % NaOH и переходом их в щелочной раствор. Тем не менее нет сомнений, что преобладающая часть вольфрама в исследуемых образцах связана с мобильным органическим веществом. Этот вывод подтверждается и данными специализированных электронно-микроскопических исследований. Несмотря на масштабные исследования обогащенных вольфрамом проб, было выявлено всего одно зерно нанометровой размерности, по составу соответствующее шеелиту.

Таблица 4. Распределение германия и вольфрама по фракциям в щелочной вытяжке из бурого угля (проба СУ-103-19)

Table 4. Ge and W distribution in the phases in alkaline extract of the brown coal (sample SU-103-19)

Показатели Indexes	Щелочная вытяжка/Alkaline extract	
	Гуминовые кислоты Humic acids	Низкомолекулярные кислоты, ионы, наноминералы Low-molecular acids, ions, nanominerals
Выход фракций, % Phase yield, %	24,8	5,2
Содержание Ge, г/т Ge content, g/t	583	34430*
Выход Ge во фракции, % Ge yield into the phases, %	5,7	71,2
Содержание W, г/т W content, g/t	542	5223*
Выход W во фракции, % W yield into the phases, %	46,2	51,7

Примечание: * – получено расчетным путем.
Note: * – calculated data.

В случае с германием картина существенно более сложная. В щелочную вытяжку переходит от 47 до 77 % германия. При этом при использовании для экстракции гуминовых кислот только 1 % NaOH (свободные гуминовые кислоты) в остаточном угле остается 40,7 % германия в пробе СУ-103-19 и 73,6 % в пробе СУ-56-18. Извлечение гуминовых кислот с использованием пирофосфата натрия для регенерирования кислот из гуматов уменьшает долю германия в остатке до 23 и 52,8 %, соответственно (табл. 2). Здесь также имеется ряд неопределенностей. Из этих данных не ясно, какая часть связанного с органикой германия не была извлечена в щелочную вытяжку и, соответственно, какова доля минеральной формы германия в данном образце остаточного угля. Частично ответ на этот вопрос дают результаты СЭМ, но они не позволяют надежно оценить соотношение органических и минеральных фаз германия в остаточном угле, а дают лишь приблизительные оценки. Очевидно лишь, что в остаточном угле органическое вещество также обогащено германием.

Электронно-микроскопические исследования

В последнее время, благодаря внедрению современной сканирующей электронной микроскопии, появилась возможность прямого количественного

определения элементов в различных минеральных и органических компонентах в углях. Исследование органического вещества 9 проб угля месторождения Спецугли показало, что содержание германия в нем варьирует весьма существенно и может достигать 2 %. Эти факты подтверждают ведущую роль органического вещества в концентрировании германия в угле. Такие же данные получены ранее для углей месторождения Спецугли методом ICP MS с лазерной абляцией [7, 11]. В этих работах было доказано, что из мацералов германием наиболее обогащен Δ -витринит, в меньшей степени – атритито-витринит. В

целом в органическом веществе германий распределен довольно неоднородно (рис. 4). В значительной части органического вещества угля его содержание не превышает предела определения анализа. Согласно данным ICP MS с лазерной абляцией, содержание Ge в Δ -витрините превосходит его содержание в атритито-витрините в 2–4 раза [3]. Эти данные не согласуются с результатами исследования органического вещества крупных германий-угольных месторождений Линканг и Вулантуга, согласно которым германий в органическом веществе распределен однородно [18].

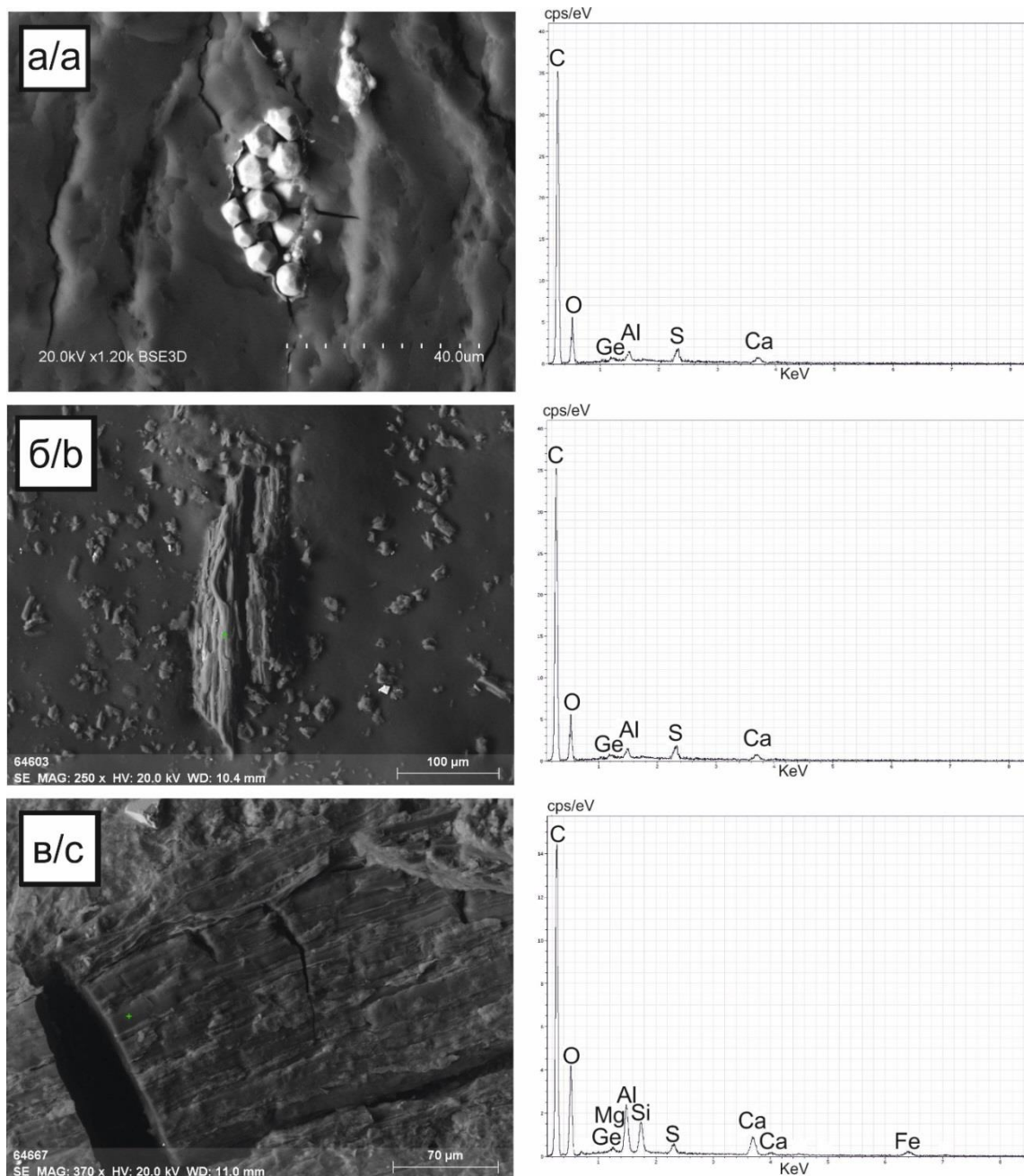


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки и рентгеновские спектры германийсодержащего органического вещества угля. Содержание германия: а) 0,84 %; б) 0,45 %; в) 0,15 %

Fig. 4. Electron-microscopic pictures and roentgen spectra of the Ge-bearing coal organic matter. Ge content is: а) 0,84 %; б) 0,45 %; в) 0,15 %

Ведущая роль органического вещества в накоплении германия в углях месторождения Спецугли подтверждается также данными прямого определения его содержания в извлеченных гуминовых кислотах и в золе гуминовых кислот. Согласно этим оценкам, содержание германия в ГК также достаточно неоднородно и достигает десятых долей процента. В золе гуминовых кислот максимальное содержание превышает 1 %. При этом зола ГК часто наряду с германием обогащена сурьмой и вольфрамом. Содержание сурьмы и вольфрама в исследуемых золах ГК обычно существенно выше, чем содержание германия. Следует отметить, что извлеченные в щелочную вытяжку гуминовые кислоты при прямом определении в них германия масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой отличаются сравнительно невысоким его содержанием, не превышающим 0,1 %. По данным СЭМ оно несколько выше, но также не превышает 0,2 %. Либо при получении щелочной вытяжки часть германия переходит из гуминовых кислот в раствор, либо германий изначально в большей степени приурочен к низкомолекулярным кислотам и, возможно, частично сконцентрирован в легкорастворимых наноминеральных фазах.

Анализ органического вещества фракций остаточного угля, полученных после извлечения битумов и ГК, показывает, что здесь также имеются фазы высокообогащенной органики, содержащей до 0,1 % гер-

мания (рис. 5). По-видимому, в углях помимо комплексных гуматов, извлеченных в щелочную вытяжку, имеются и другие формы соединений германия с органическим веществом. При этом наряду с германием в органическом веществе остаточного угля отмечено аномально высокое содержание молибдена (до 0,13 %), но не установлены вольфрам и сурьма.

Исследование пирита, считавшегося одним из возможных минералов-концентраторов германия, показало, что содержание германия в нем ниже пределов обнаружения анализа. Пириты в углях представлены кристаллами различного габитуса: гексаэдры, октаэдры, ромбододекаэдры и другие сложные формы с преобладанием гексаэдров. В то же время на поверхности пирита обнаружены прозрачные алюмосиликатные (силикатные) пленки (рис. 6). Каждый кристалл пирита обернут в такую пленку, как в кокон. При механическом воздействии пленка разрушается. Пленка существенно обогащена германием. Мелкие размеры кристаллов пирита и покрывающих их пленок не позволяют получить «чистые» энерго-дисперсионные спектры без влияния фона, но даже в этом случае в них содержание германия определяется на уровне 0,15–0,4 %. Обогащение пленок хорошо видно при картировании распределения германия на участке с пиритами, покрытыми такими пленками (рис. 6). Такие пленкоподобные кремнистые агрегаты, обогащенные германием, встречаются и вне связи с пиритом.

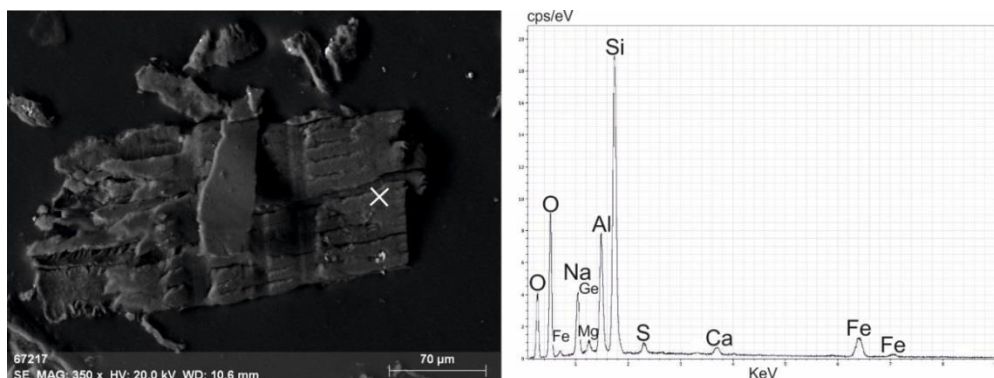


Рис. 5. Электронно-микроскопический снимок органического вещества угля, оставшегося после извлечения битумов и гуминовых веществ и его рентгеновский спектр

Fig. 5. Electron-microscopic picture of the organic matter of the coal residue after the bitumen and humic substances extraction and its roentgen spectrum

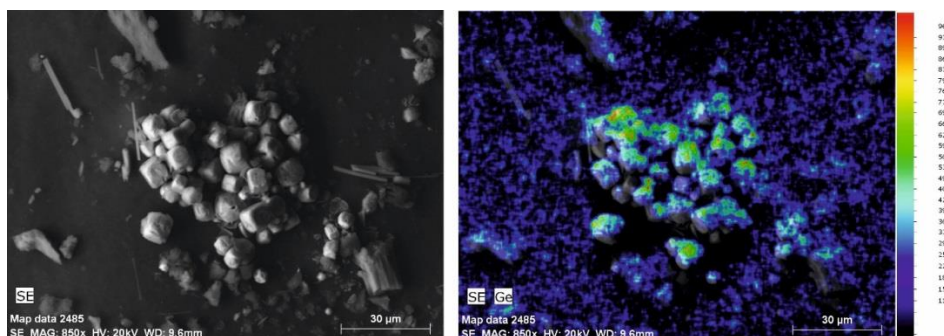


Рис. 6. Электронно-микроскопический снимок скопления пирита, покрытого алюмосиликатной пленкой (слева) и карта распределения германия (справа)

Fig. 6. Electron-microscopic picture of the pyrite cluster covered with aluminosilicate film (left) and a map of Ge distribution (right)

В пиритах, не имеющих такого алюмосиликатного (силикатного) покрытия, значимых содержаний германия не выявлено (рис. 7). В них может присутствовать примесь мышьяка. Эти результаты коррессируют

с данными, полученными для германиевых месторождений Линканг и Вулантуга, согласно которым пирит имеет важное значение в концентрировании As, Hg и Tl, но не связан с накоплением Ge и W [19, 20].

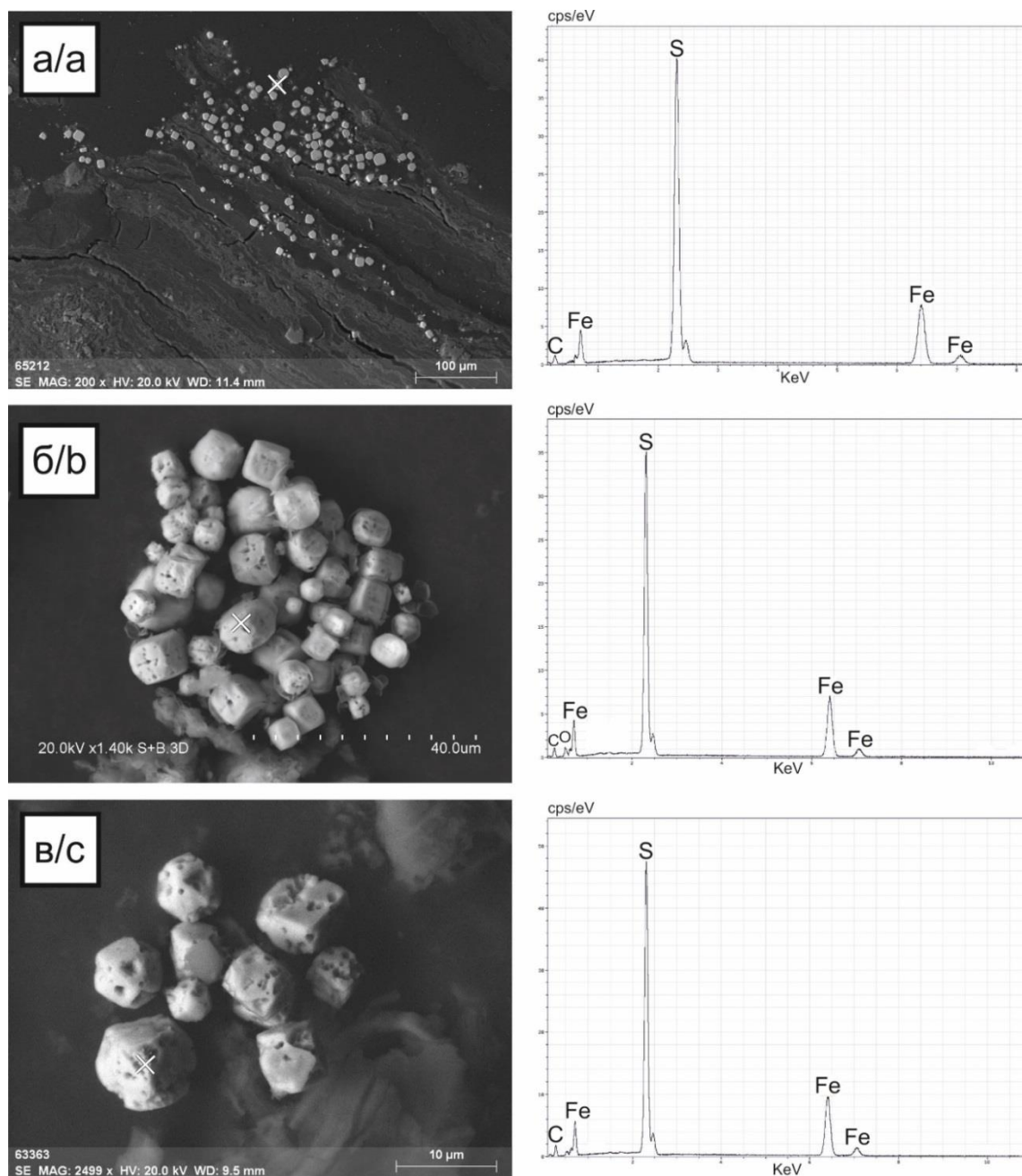


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок пиритов (а) и их рентгеновский спектр. Полированный шлиф. Снимки пиритов со следами коррозии (б, в) и их рентгеновские спектры. Сколы образцов

Fig. 7. Electron-microscopic picture of pyrites (a) and their roentgen spectra. Polished thin section. The pictures of pyrite with instances of corrosion (b, c) and their roentgen spectra. Fractures of the samples

В связи с тем, что скопления пирита часто приурочены к микротрещинам в органическом веществе, образуют скопления и линзочки, очевидно, что сформировались они после торфяной стадии, возможно, в результате сульфат-редукции сульфатов, характерных для углей месторождения в целом. Важной особенностью этих пиритов является наличие на поверхности следов коррозии в виде канавок, выемок, отверстий разной формы

(рис. 7). После этого отдельные блоки кристаллов пирита были упакованы в прозрачные пленкоподобные «конконы». Соответственно, покрывающие пирит пленки еще более поздние и связаны с отложением свободного кремнезема, формирующегося, вероятно, в результате его выноса при преобразовании полевых шпатов в каолинит при образовании коры выветривания. Наличие такого избыточного аутигенного кремнезема в аргилли-

тах месторождения отмечено Я.Э. Юдовичем при проведении литохимического анализа пород и золы углей месторождения Спецугли [5]. Возможно, эти пленки представлены силикогерманатом. Следует заметить, что такие пленки отмечены и вне связи с конкретными зернами пирита. Эти факты свидетельствуют о том, что формирование германиевой минерализации в месторождении может быть более растянуто во времени, чем предполагалось ранее, и не ограничивается торфяной стадией. Возможно даже, что накопление германия происходит и в настоящее время. Об этом свидетельствует состав дренирующих через пласт III нижний современных кислых сульфатных вод, аномально обогащенных германием (57 мкг/л).

В углях, расположенных вблизи выступа фундамента в центре месторождения, установлены много-

численные мелкие тонкодисперсные агрегаты, представленные преимущественно гидроокислами железа с примесью минеральных фаз алюмосиликатного и сульфатного состава. Содержание германия в этих минеральных агрегатах колеблется от 2,6 до 6,2 % (рис. 8). Помимо германия в них содержится от долей процента до 4,8 % сурьмы, иногда отмечается мышьяк до 2 %.

Высокожелезистые минеральные фазы, соответствующие по составу ярозиту, были выявлены в высокогерманиеносных углях пласта III нижний (рис. 8, c).

Аналогичные по составу минеральные фазы встречаются и в углефицированной древесине, извлеченной из межпластовых песчаных отложений. Во внешней оболочке распространены многочисленные оксиды железа (рис. 9, a), содержащие до 5 % германия.

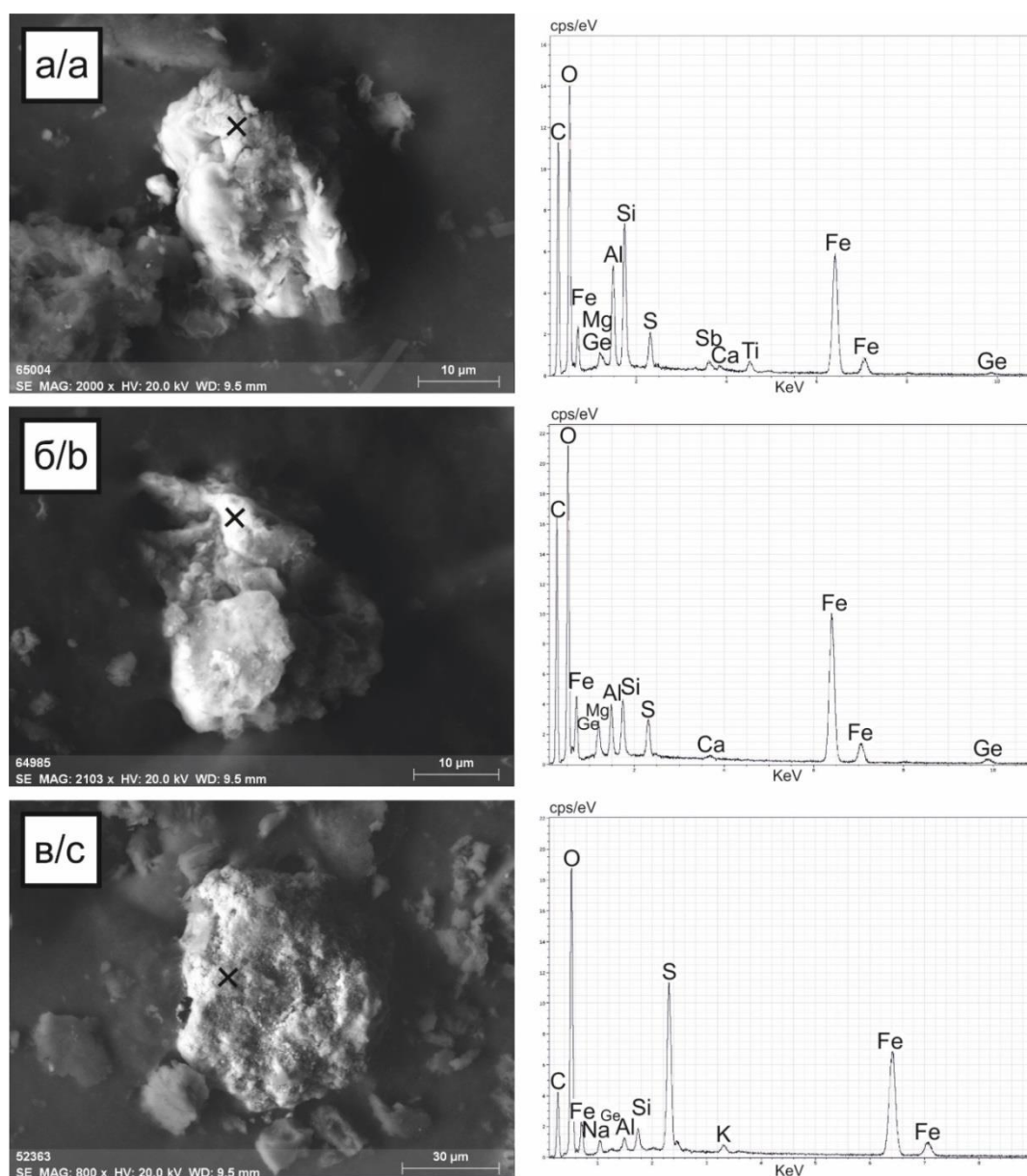


Рис. 8. Электронно-микроскопические снимки высокожелезистых микроагрегатов с германием и их рентгеновские спектры: а) гидрогётит, 2,7 % Ge; б) гидрогётит, 6,2 % Ge; в) ярозит, 0,1 % Ge

Fig. 8. Electron-microscopic pictures of high-iron microconglomerates with Ge and their roentgen spectra: a) hydrogoethite, 2,7 % Ge; b) hydrogoethite, 6,2 % Ge; c) jarosite, 0,1 % Ge

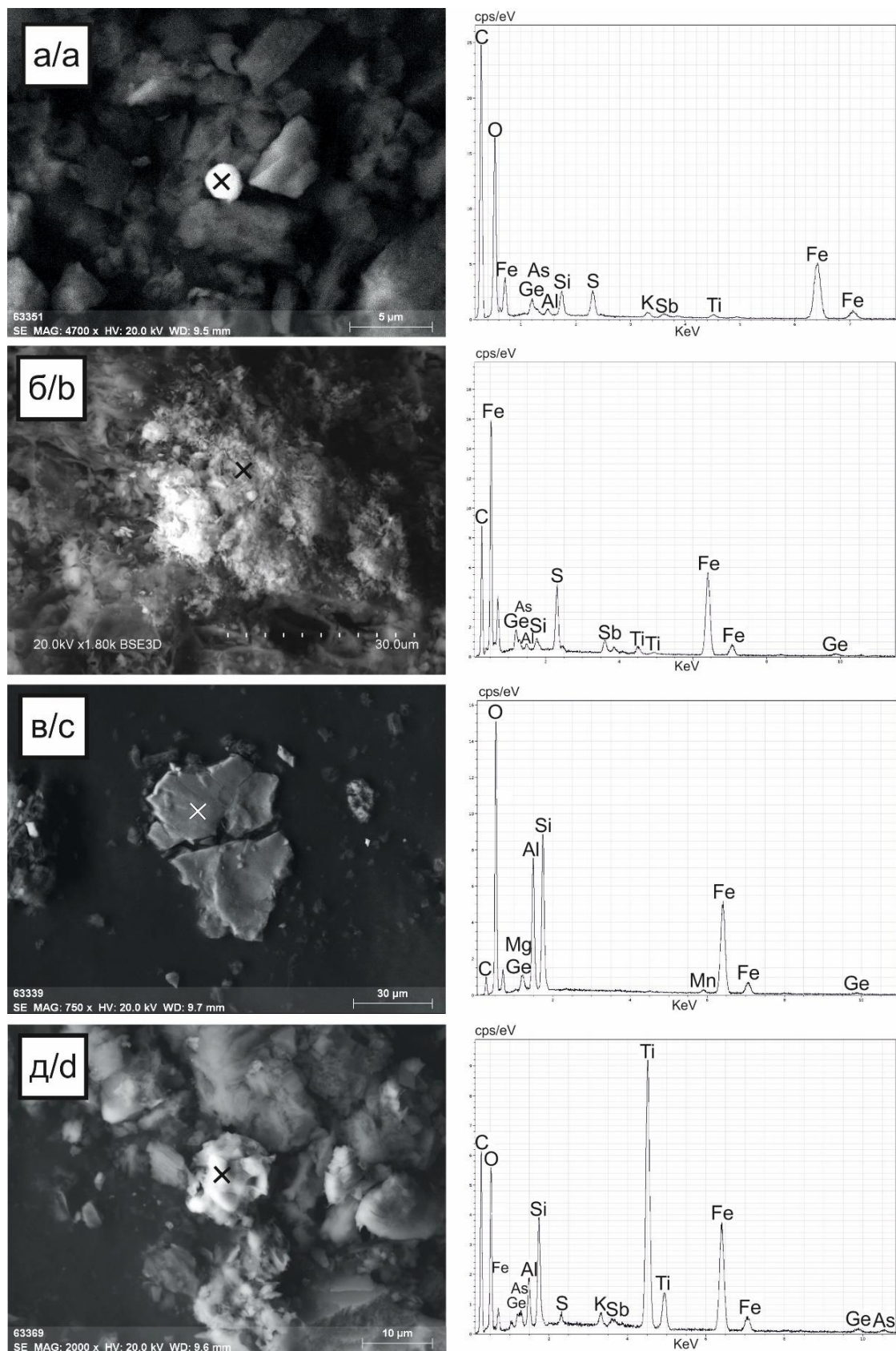


Рис. 9. Электронно-микроскопические снимки германиеносных оксидов железа (а) 4 % Ge; сульфатов железа (б) 6,0 %, железо-магнезильного хлорита (в) 1,8 % Ge и псевдорутила (д) 2 % в ископаемой древесине и их рентгеновские спектры

Fig. 9. Electron-microscopic pictures of Ge-bearing iron oxides (a) 4,5 % Ge; iron sulfates (b) 6 %, iron-magnesian chlorite (c) 1,8 % Ge, and pseudorutile (d) in the fossil wood and their roentgen spectra

Землистые агрегаты сульфата железа (рис. 9, б) помимо германия (от 3,5 до 6 %) содержат примеси Sb, Ti и As. Содержание сурьмы изменяется от 4,5 до 9,5 %.

В углефицированной древесине установлены и другие содержащие германий минеральные фазы, такие как железо-магнезиальный хлорит (рис. 9, в) и псевдорутил (рис. 9, д), содержащий до 2 % германия.

Оксиды железа, обогащенные германием, встречаются в углефицированной древесине, как во внешней части обломка, так и внутри. Сульфаты железа были обнаружены только в самой древесине внутри образца. В органическом веществе внешней части образца содержание германия (от 0,1 до 2 %) выше, чем во внутренней зоне (от «ниже предела обнаружения» до 0,85 %). Выявленный факт такой зональности распределения германия в углефицированных обломках хорошо согласуется с гидрогенной моделью накопления в них германия [21].

Все минеральные фазы с высоким содержанием германия и с переменным количеством сурьмы и

мышьяка представлены агрегатами, обогащенными окисным железом в форме гётита или гидрогётита. Возможность соосаждения германия с гидроокислами железа доказана экспериментально еще в середине прошлого столетия [22]. При этом здесь же встречаются сульфаты кальция (ангидрит), бария (барит). В этих комплексных полиминеральных агрегатах также присутствует в количестве 1–2 % сульфатная фаза. Из безжелезистых минеральных фаз с германием выявлены только алюмосиликатные (силикатные) пленки не выясненной минеральной принадлежности.

В углях, непосредственно примыкающих к выступу фундамента и залегающих на коре выветривания грейзенизированного гранита, выявлены железомарганцевые стяжения, обогащенные германием, мышьяком и вольфрамом (рис. 10). Хорошо видна их вторичная природа по отношению к поверхности, на которой они сформировались.

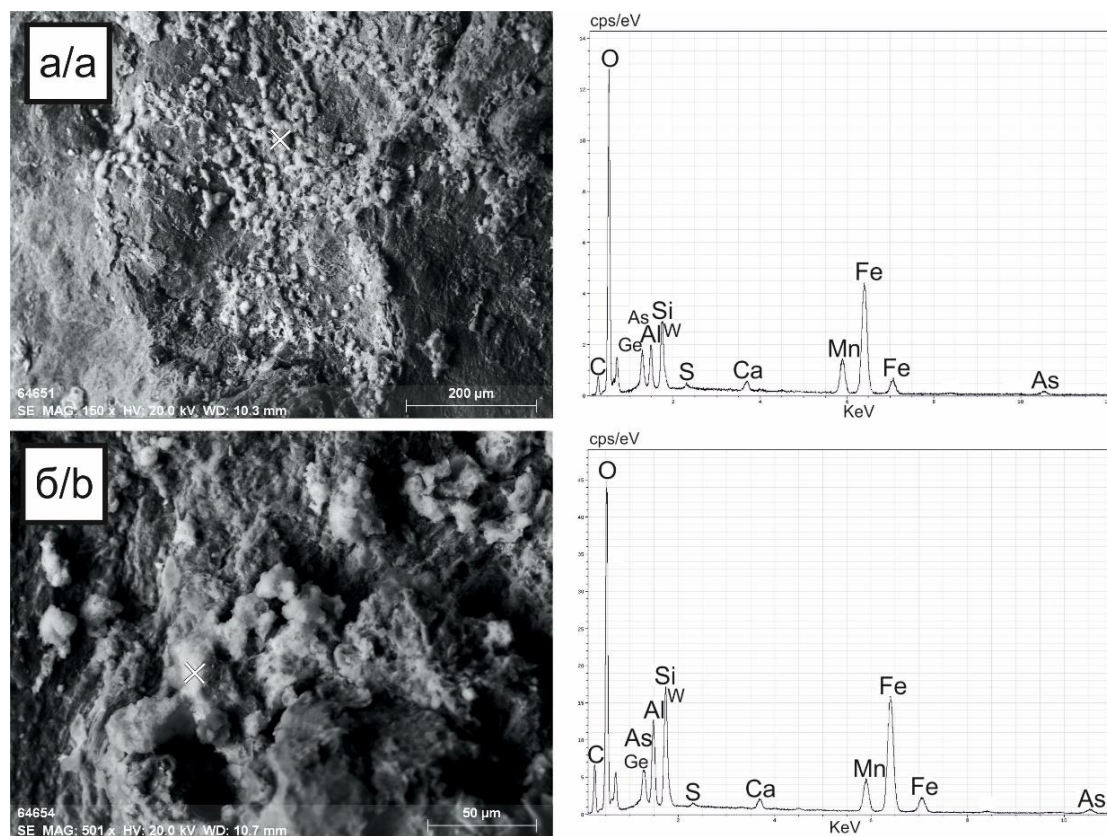


Рис. 10. Электронно-микроскопические снимки железо-марганцевых корок в угле и их рентгеновские спектры: а) Ge – 0,24 %, As – 5,1 %, W – 1,4 %; б) Ge – 0,47 %, As – 5,5 %, W – 2,0 %

Fig. 10. Electron-microscopic pictures of the iron-manganese crusts in the coal and their roentgen spectra: а) Ge – 0,24 %, As – 5,1 %, W – 1,4 %; б) Ge – 0,47 %, As – 5,5 %, W – 2,0 %

Никаких других минеральных фаз вольфрама за исключением одного обломка шеелита микронного размера в углях месторождения выявлено не было. По-видимому, только в непосредственной близости от источника вольфрам соосаждался с железом и марганцем. В других случаях он мигрировал и концентрировался в органическом веществе в форме комплексных гуматов.

Следует отметить, что подобные Fe-Mn «корки» вблизи фундамента, но не связанные с углем, отличаются низким содержанием как германия (1,0 г/т), мышьяка (2,1 г/т), так и вольфрама (7,1 г/т). По-видимому, здесь сыграла роль более кислая восстановительная среда минералообразования в угольном пласте (палеоторфе), в сравнении с окислительной средой, характерной для формирующейся коры выветривания.

Обсуждение результатов

В результате исследования форм нахождения германия и вольфрама в высоко германиеносных углях месторождения Спецугли выявлены их многообразные органические и минеральные формы.

Для вольфрама формы нахождения ограничиваются органически связанными формами (98–99 %) и незначительными количествами минеральных фаз, доля которых в общем балансе металла в месторождении не превышает 1–2 %. В органическом веществе вольфрам сконцентрирован в составе гуминовых кислот, гуматов и, предположительно, в сорбированных формах на органическом веществе. Минеральные фазы представлены зерном шеелита и агрегатом Fe-Mn состава, содержащим 1,4 % W. Эти данные не противоречат имеющейся информации о ранее установленных формах нахождения вольфрама в углях.

Формы нахождения вольфрама в углях в целом изучены недостаточно и в существенно меньшей степени, чем формы германия. Большинство из немногочисленных сведений, обобщенных в работе Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис [23], основаны на косвенных методах оценки доли минеральной и органической форм вольфрама. В большинстве оценок отмечается преобладание его органической формы нахождения. Согласно исследованиям фракций различного удельного веса германиеносных углей Новиковского (о. Сахалин) и Ангренского (Узбекистан) месторождений, выполненным в Институте горючих ископаемых, основная масса вольфрама в бурых углях этих месторождений связана с органическим веществом [24]. Селективное выщелачивание различными кислотами разных углей США показало инертность вольфрама [25, 26], что позволило предположить нахождение вольфрама или в органическом веществе, или в оксидах. Из недавно опубликованных данных следует, что в углях распространены как органические, так и минеральные формы вольфрама. Так, микрозондовое исследование лигнитизированной древесины в породах вскрыши Павловского месторождения Приморья показало присутствие самородного вольфрама, сложного хлорида и бромида вольфрама [27]. Электронно-микроскопические исследования, выполненные для Ушумунского и Сутарского месторождений угля в Забайкалье, показали, что в них преобладают минеральные формы вольфрама [28, 29]. Для Ушумунского месторождения – это вольфрам в самородной форме, в форме интерметаллидов W-Co и в форме оксидов. В углях Сутарского месторождения отмечены шеелит, вольфрамит, гюбнерит, ферберит и штольцит наряду со сложными по составу микроминеральными образованиями. Штольцит выявлен и в углях германиеносного месторождения Вьлче Поле в Болгарии [30]. С другой стороны, данные EXAFS-спектроскопии подтверждают отсутствие или незначительный вклад отдельных богатых вольфрамом минералов, таких как шеелит или ферберит, в баланс массы W в исследованных образцах из крупнейших германиевых месторождений Вулантуга и Линканг [18].

Формы нахождения германия в месторождении Спецугли существенно более разнообразны, чем

формы вольфрама. Вопреки устоявшемуся представлению о незначительной роли минеральных форм в концентрировании германия, в высокогерманиеносных углях этого месторождения их значение может быть весьма существенным. При этом в результате исследований в целом подтверждена ведущая роль органических форм нахождения германия в общем балансе металла.

Исследование форм нахождения германия имеет почти вековую историю. Он начал изучаться в углях одним из первых элементов-примесей. Установлена ведущая роль органического вещества в накоплении германия в углях. Показано, что наиболее обогащены им витреновые угли. Еще в 1950-е гг. экспериментально доказано [31], что в торфе, как прекурсор угля, германий концентрируется в следующих пропорциях: 80 % извлекается в щелочной раствор (1 % NaOH) и около 20 % остается в нерастворимом остатке. При этом 32,4 % выделяется в качестве гуминовых кислот, а 46,5 % содержится в сернокислом растворе фульвокислот. В углях это соотношение нарушается в связи с процессами конденсации фульвокислот. Современные данные показывают, что в германиеносных бурых углях соотношение органической и минеральной форм германия может существенно варьировать. Так, согласно результатам исследований германиеносных углей месторождения Спецугли [6], не менее 60 % германия связано с мобильным органическим веществом, в том числе от 25 до 60 % приходится на комплексные соединения германия с гуминовыми кислотами, и 8–39 % связано с низкомолекулярной фракцией органического вещества, не осаждаемой кислотами. По данным М.Я. Шпирта [4], германий сосредоточен в органическом веществе углей в виде комплексных гуматов (75–96 %) и германийорганических соединений (3–24 %). Количество неорганических соединений (силикогерманатов) не превышает 2–3 % и повышается в некоторых германийсодержащих углистых породах (2–9 %). По другим сведениям, в минеральной форме находится от 1,7 до 10,3 [32] или от 7 до 24 % германия [33]. В.И. Вялов и др. [7], используя методику ICP MS с лазерной абляцией, впервые наглядно показали на примере германиеносных углей месторождения Спецугли, что основным носителем германия в углях является Δ -витринит. В связи с тем, что степень разложения органического вещества Δ -витринита выше, чем атритовитринита, в Δ -витрините большее количество гуминовых и фульвокислот, поэтому концентрация Ge, Mo, W, Sb в Δ -витрините максимальна [7]. Сходная картина получена для месторождений Вулантуга и Линканг (Китай) с использованием электронного микрозонда [34]. Показано, что Ge в месторождениях встречается исключительно в мацералах, и не было идентифицировано Ge-содержащих минералов в углях с высоким содержанием Ge. Противоречат этим данным результаты электронно-микроскопических исследований, выполненных международным коллективом исследователей [35], установивших в составе германиеносных углей месторождения Вулантуга микрочастицы (<0,5 мкм) оксидов германия. Испол-

зовав метод EXAFS спектроскопии, В. Etschmann и др. [18] показали на примере высокогерманиеносных углей этих месторождений, что Ge в органическом веществе распределен однородно. Следует заметить, что вывод по распределению германия в этих двух месторождениях противоречит и многочисленным другим данным, так как известно, что германий концентрируется по-разному в разных группах органического вещества.

Исследование высокогерманиеносных углей месторождения Спецугли показало, что от 47 до 77 % Ge выходит в щелочной экстракт при извлечении гуминовых кислот. При этом в твердый осадок гуминовых кислот выделяется лишь небольшая часть германия. Остальной Ge остается в растворе. Не ясно, в какой форме содержится германий, извлеченный в вытяжку, но не связанный с гуминовыми кислотами. Согласно опубликованным данным для месторождения Спецугли, но для существенно менее обогащенных германием углей, на комплексные соединения с гуминовыми кислотами приходится 25–60 % от общего его количества в органическом веществе и 8–39 % связано с низкомолекулярными кислотами [6]. Кроме того, по данным А.С. Якушевич с соавторами, в исследованных ими пробах до 24 % германия при щелочной экстракции переходит из неорганических соединений в экстракт в форме минеральных наночастиц, стабилизированных органическим веществом [6]. В рассматриваемых нами случаях в щелочной вытяжке резко преобладает доля Ge, связанного с веществами, не осаждаемыми с твердыми гуминовыми кислотами. Какая-то его доля в этом растворе, очевидно, связана с фульвокислотами и другими низкомолекулярными кислотами. Остальная часть Ge может быть связана с неорганическим веществом, представленным, в частности, кремниевой кислотой, с которой германий способен давать соединения типа силикогерманатов. На возможную роль кремнекислоты указывают факты выпадения кремнезема при выпаривании щелочного раствора, полученного при извлечении гуминовых кислот из углей месторождения [6]. Согласно этим же данным, из золы угля в раствор 1 % NaOH переходит до 17 % германия. Известно, что NaOH способен переводить минеральные формы Ge в раствор в форме германатов и полигерманатов [36]. Вероятно, процесс извлечения гуминовых кислот сопровождается частичным высвобождением Ge в щелочной раствор и из его минеральных фаз. Эти результаты согласуются с экспериментальными данными для германиеносных торфов. Установлена высокая доля германия (58,1 %), не связанного с гуминовыми кислотами, в щелочной вытяжке (1 % NaOH) из торфа [31]. Высказано предположение о его связи с фульвокислотами.

Минеральные фазы германия в германиеносных углях месторождения Спецугли достаточно разнообразны, но при этом ограничиваются железосодержащими минералами (оксидами и сульфатами железа) и, возможно, силикогерманатами. Причем характер этих минеральных фаз указывает на полихронность формирования германиевого оруденения в месторожде-

нии. С одной стороны, содержащие германий ярозит, гётит, гидрогётит с высокой долей вероятности сформировались в связи с образованием коры выветривания по грейзенизированным гранитам. Особенно отчетливо это видно на примере углей и углистых алевролитов, обрамляющих выступ, представленный реликтовой корой выветривания по грейзенизированным гранитам в центре месторождения. Германиеносные угли здесь вблизи контакта насыщены железомарганцевыми «корками», содержащими до 0,5 % Ge, 2% W и 5,5 % As. С другой стороны, в углях присутствуют силикатные пленки, содержащие до 0,5 % Ge и сформировавшиеся по пириту. Пирит выполняет полости, заполняя трещинки в органическом веществе, образуя линзообразные выделения. Отчетливо видна его эпигенетичность по отношению к гелефицированному органическому веществу углей. Частично пириты подверглись коррозии. После этого по ним развивались силикатные пленки с аномально высоким содержанием германия. Формирование этих пленок очевидно эпигенетично по отношению к пириту. Причем такие пленки выявлены и вне связи с пиритом.

Неоднозначное соотношение форм нахождения германия в металлоносных углях месторождения Спецугли подчеркивается и отсутствием значимой корреляции между содержанием германия в угле с зольностью. Отсутствие такой связи отмечают в своей работе и другие авторы [6]. Причины нарушения корреляционной связи могут быть связаны со значительной ролью аутигенных германийсодержащих минеральных фаз и аморфных силикатных пленок в общем балансе металла в германиеносных углях. При этом из всего массива полученных данных очевидно преобладание органических форм германия.

Заключение

Проведенные исследования показали, что в высокогерманиеносных углях месторождения Спецугли германий характеризуется разнообразными формами нахождения. Наряду с преобладающей органической формой нахождения Ge значительную роль играют минеральные фазы. Органические формы германия разнообразны и не ограничиваются комплексными гуматами. Значение минеральных фаз в концентрировании германия в высокогерманиеносных углях, вероятно, значительно выше, чем предполагалось ранее. В угольных пластах, особенно отчетливо вблизи коры выветривания по грейзенизированным гранитам, широко распространены различные германийсодержащие минеральные фазы микронной и нанометровой размерности. В углях встречаются алюмосиликатная (силикатная) форма германия, разнообразные железистые (гидрогётит, гётит, ярозит) и полиминеральные фазы. Алюмосиликатная (силикатная) фаза представлена пленкоподобными агрегатами, содержащими 0,15–0,4 % германия. В железистых минеральных агрегатах содержится от 0,1 до 6,2 % германия. Аномальные содержания Ge совместно с W и As установлены в железомарганцевых корках – продуктах выветривания грейзенизированных гранитов фундамен-

та, сформировавшихся в условиях палеоболота. Выявленные минеральные фазы германия в углях месторождения Спецугли хорошо согласуются с общей геохимией этого элемента, обладающего родством с Fe и Si и способного изоморфно входить в структуру их минералов.

Наличие вторичных германийсодержащих минеральных фаз в углях, развитых по диагенетическим минералам, позволяет предполагать, что формирование германиевой минерализации в месторождении может быть полихронным и не ограничивается торфяной стадией.

Для вольфрама характерна преимущественно органическая форма нахождения. Роль минеральных форм W в общем его балансе в углях месторождения

Спецугли незначительна. В изученных 9 пробах угля выявлено всего 1 зерно шеелита микронного размера. Вблизи коры выветривания вольфрам в углях встречается в качестве примеси также в железомарганцевых «корках». Этот вывод согласуется с результатами анализа распределения W по фракциям группового состава. После извлечения гумусовых кислот в щелочную вытяжку переходит в среднем 99 % вольфрама. При этом в щелочной вытяжке около половины его связано с гуминовыми кислотами, а остальная часть – с низкомолекулярными органическими кислотами.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Середин В.В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // Угольная база России. Т. VI. – М.: Геоинформмарк, 2004. – С. 453–519.
2. Seredin V., Finkelman R. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types // International Journal of Coal Geology. – 2008. – V. 76. – P. 253–289.
3. Вялов В.И., Олейникова Г.А., Наставкин А.В. Особенности распределения германия в углях Павловского месторождения // Химия твердого топлива. – 2020. – № 3. – С. 49–56.
4. Шпирт М.Я. Формы соединений микроэлементов и их превращения при переработке твердых горючих ископаемых // Химия твердого топлива. – 2004. – № 6. – С. 62–84.
5. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Германий в углях. – Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2004. – 216 с.
6. Формы нахождения германия в бурых углях германиеносного месторождения Приморья / А.С. Якушевич, С.Ю. Братская, В.В. Иванов, Н.В. Полякова, В.А. Авраменко // Геохимия. – 2013. – № 5. – С. 453–461.
7. Редкие металлы в буроугольных 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. Костин Ю.П., Мейтов Е.С. К генезису месторождений высокогерманиеносных углей и критериям их поисков // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1972. – № 1. – С. 112–119.
9. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И., Чекрыжов И.Ю. Проблемы стратиграфии Павловского угольного поля (Приморье) // Тихоокеанская геология. – 2005. – № 6. – С. 59–76.
10. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья (геологическое строение, минерализация и геодинамика углегеоноза). – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 248 с.
11. Кузеванова Е.М. Металлоносность углей кайнозойских буроугольных месторождений Приморья: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – СПб., 2014. – 133 с.
12. Формы нахождения редкоземельных элементов (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) в углях Северной Азии / С.И. Арбузов, Р.Б. Финкельман, С.С. Ильенко, С.Г. Маслов, А.М. Межибор, М.Г. Блохин // Химия твердого топлива. – 2019. – № 1. – С. 3–25.
13. Occurrence mode of selected elements in coal of the Ordos Basin / J. Wang, L. Xiao, P. Li, S. I. Arbutov, S. Ding // Energy Exploration & Exploitation. – 2019. – V. 37. – № 6. – P. 1680–1693.
14. Modes of occurrence of Rare earth elements in peat from Western Siberia / S.I. Arbutov, S.G. Maslov, R.B. Finkelman, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok, M.G. Blokhin, E.V. Peregudina // Journal of Geochemical Exploration. – 2018. – V. 184. – P. 40–48.
15. Середин В.В. Аномальные концентрации элементов-примесей в месторождении германия «Спецугли» (Павловское буроугольное месторождение, Южное Приморье). Сообщение 1. Сурьма // Литология и полезные ископаемые. – 2003. – № 2. – С. 1–9.
16. ГОСТ 9517-94. Топливо твердое. Методы определения выхода гуминовых кислот. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 11 с.
17. ГОСТ 10969-91 (ИСО 975-85, ИСО 1017-85) Угли бурые и лигниты. Методы определения выхода толуольного экстракта и содержания в нем растворимых в ацетоне веществ (смолистые вещества). – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 11 с.
18. 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.
19. 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, Hu. Liu, W. Xue, L. Zhao // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 90–91. – P. 72–99.
20. 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 // Int. J. of Coal Geology. – 2015. – V. 152. – P. 19–46.
21. Yudovich Ya.E. Coal inclusions in sedimentary rocks: a geochemical phenomenon. A review // Int. J. Coal Geology. – 2003. – V. 56. – № 3–4. – P. 203–222.
22. Сандульская Т.И., Шпирт М.Я. О соосаждении микроколичеств германия с гидроокисью железа // Доклады АН СССР. – 1960. – Т. 134. – № 5. – С. 1108–1110.
23. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
24. Юровский А.З. Минеральные компоненты твердых горючих ископаемых. – М.: Недра, 1968. – 214 с.
25. Combustion and leaching behavior of elements in the Argonne Premium Coal Samples / R.B. Finkelman, C.A. Palmer, M.R. Krasnow, P.J. Aruscavage, G.A. Sellers, F.T. Dulong // Energy Fuels. – 1990. – V. 4. – № 6. – P. 755–766.
26. An evaluation of leaching to determine modes of occurrence of selected toxic elements in coal / C.A. Palmer, S.R. Krasnow, R.B. Finkelman, W.M. D'Angelo // J. Coal Qual. – 1993. – V. 12. – № 4. – P. 135–141.
27. Середин В.В., Магазина Л.О. Минералогия и геохимия ископаемой древесины Павловского буроугольного месторождения (Приморье) // Литология и полезные ископаемые. – 1999. – № 2. – С. 158–173.
28. Лаврик Н.А., Литвинова Н.М., Ван-Ван-Е А.П. Самородный вольфрам и другие микроминеральные фазы вольфрама в бурых углях и золе Ушумунского буроугольного месторождения и Сутарского проявления (Дальний Восток) // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов восточной Азии: Третья Всерос. науч. конф.: сб. докладов в 2-х т. – Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2014. – Т. 1. – С. 120–123.
29. Лаврик Н.А., Литвинова Н.М. Микроминеральная составляющая бурых углей и золы Ушумунского и Сутарского месторождений (юг Дальнего Востока) и перспективы использования // Вестник ЗабГУ. – 2015. – Т. 118. – № 3. – С. 38–47.
30. Mineralogy and geochemistry of vitrain lens with unique trace element content from the Vulche Pole coal deposit, Bulgaria /

- S.V. Vassilev, G.M. Eskenazy, M.P. Tarasov, V.I. Dimov // *Geologica Balcanica*. – 1995. – V. 25. – № 3–4. – P. 111–124.
31. Манская С.М., Дроздова Т.В. Геохимия органического вещества. – М.: Наука, 1964. – 315 с.
32. Germanium occurrence in Lincang superlarge deposit in Yunnan, China / H.P. Zhuang, J.L. Lu, J.M. Fu, J.Z. Liu, C.G. Ren, D.G. Zou // *Sci. China D 41 (Suppl.)*. – 1998. – P. 21–27.
33. Bekyarova E.E., Roushev D.D. Forms of binding of germanium in solid fuels // *Fuel*. – 1971. – V. 50. – P. 272–279.
34. Electron probe microanalysis of major and trace elements in coals and their low-temperature ashes from the Wulantuga and Lincang Ge ore deposits, China / Q. Wei, S. Dai, L. Lefticariu, G. Costin // *Fuel*. – 2018. – V. 215. – P. 1–12.
35. 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 // *Int. J. of Coal Geology*. – 2006. – V. 66. – P. 119–136.
36. Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. 2 // под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976. – 311 с.

Поступила 15.10.2020 г.

Информация об авторах

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

Ильенко С.С., ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чекрызов И.Ю., научный сотрудник Дальневосточный геологический институт ДВО РАН.

UDC 553.493:550.42

MODES OF OCCURRENCE OF GERMANIUM AND TUNGSTEN IN THE SPETSUGLI GERMANIUM ORE FIELD (RUSSIAN FAR EAST)

Sergey I. Arbuzov¹,
siarbuzov@mail.ru

Sergey S. Ilenok¹,
ilenokss@tpu.ru

Igor Yu. Chekryzhov²,
chekr2004@mail.ru

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

² Far Eastern Geological Institute FEB RAS,
159, 100th anniversary of Vladivostok avenue, Vladivostok, 690022, Russia.

The relevance of the research is conditioned by the need of the assessment of the modes of occurrence of germanium and other secondary trace elements in rare-metal coal deposits.

The main objective is to study the modes of occurrence of germanium and tungsten in metal-bearing coals of the Spetsugli deposit (Russian Far East).

Objects: coal and coal siltstones of the Ge-coal deposit.

Methods: correlation analysis, phase composition study of the brown coal, mass spectrometry with inductively coupled plasma, instrumental neutron activation analysis, scanning electron microscopy.

Results. Main modes of Ge and W occurrence were studied. High-germanium-bearing coals of the Spetsugli deposit are characterized by different modes of occurrence. Along with the prevailing organic mode of Ge occurrence, mineral phases play a significant part. The importance of the mineral modes of Ge occurrence in the high-germanium coals is probably much higher than it has been previously thought. Various micron and nanometer mineral phases of Ge are widespread in the coal seams, especially near the weathering crust along the greisenized granites. In coals, aluminosilicate (silicate) mode of Ge, various ferrous (hydrogoethite, goethite, jarosite) and polymineral phases were met. The aluminosilicate (silicate) phase is represented by film-like congeries containing 0.15–0.4 % of germanium. Ferrous mineral congeries contain from 0.1 to 6.2 % of germanium. Anomalous Ge contents together with W and As were found in ferromanganese crusts – weathering products of greisenized granite of the basement, formed in the paleo-bog conditions. The presence of the secondary mineral phases of germanium in the coals allows assuming that Ge mineralization formation in the deposit can be longer in time than it has been considered earlier and is not limited to the peat stage. The research conducted has shown that in the highly-germanium coals of the Spetsugli deposit along with the organic modes of Ge occurrence the mineral phases play a significant role. The organic modes of occurrence are diverse and are not limited to complex humates. Tungsten is mainly characterized by the organic mode of occurrence. The role of the W mineral forms in its general balance in the coals of the Spetsugli deposit is insignificant. Only 1 grain of scheelite was found in the coals. Close to the weathering crust, tungsten in the coals was also found in the iron-manganese «crusts». It agrees with the results of the analysis of the W distribution coal phases. After the extraction of humic acids, 99 % of tungsten on the average passes into the alkaline extract. In the alkaline extract, about half of it is associated with the humic acids, and the rest is associated with the low-molecular organic acids.

Key words:

Ge-coal deposit, coal, modes of occurrences, germanium, tungsten, organic association, micro-mineral forms.

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

REFERENCES

1. Seredin V.V. Metallonosnost ugley: usloviya formirovaniya i perspektivy osvoeniya [Metal content of coals: formation conditions and development prospects]. *Ugolnaya baza Rossii* [Coal base of Russia]. T. VI. Moscow, Geoinformmark Publ., 2004. pp. 453–519.
2. Seredin V., Finkelman R. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*, 2008, vol. 76, pp. 253–289.
3. Vyalov V.I., Oleynikova G.A., Nastavkin A.V. Features of the distribution of germanium in the coals of the Pavlovsky deposit. *Solid Fuel Chemistry*, 2020, no. 3, pp. 49–56. In Rus.
4. Shpirt M.Ya. Forms of compounds of trace elements and their transformation during the processing of solid fossil fuels. *Solid Fuel Chemistry*, 2004, vol. 38, no. 6, pp. 51–72.
5. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Germaniy v uglyakh* [Germanium in coals]. Syktyvkar, Komi NC UrO RAS Publ., 2004. 216 p.
6. Yakushevich A.S., Bratskaya S.Y., Ivanov V.V., Polyakova N.V., Avramenko V.A. Germanium speciation in lignite from a germanium-bearing deposit in Primorye. *Geochemistry International*, 2013, vol. 51, no. 5, pp. 405–412. In Rus.
7. Vyalov V.I., Larichev A.I., Kuzevanova E.V., Bogomolov A.H., Gamov M.I. Redkie metally v burougnolnykh mestorozhdeniyakh Primorya i ikh resursniy potentsial [Rare metals in lignite deposits of Primorye and their resource potential]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*, 2012, no. 51, pp. 96–105.
8. Kostin Yu.P., Meytov E.S. K genezisu mestorozhdeniy vysokogermanienosnykh ugley i kriteriyam ikh poiskov [On the genesis of high-Germaniferous coal deposits and criteria for their prospecting]. *Izv. AN SSSR. Ser. geol.*, 1972, no. I, pp. 112–119.
9. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I., Chekryzhov I.Yu. Problemy stratigrafii Pavlovskogo ugnolnogo polya (Primore) [Problems of stratigraphy of the Pavlovskoe coal field (Primorye)]. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2005, no. 6, pp. 59–76.
10. Sedykh A.K. *Kaynozoyские riftогенные впадины Primorya (geologicheskoe stroenie, minerageniya i geodinamika uglegeneza)* [Cenozoic riftogenic depressions in Primorye (geological structure,

- mineralogy and geodynamics of coal genesis)]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2008. 248 p.
11. Kuzevanova E.M. *Metallonost ugley kaynozoysskikh burougolnykh mestorozhdeniy Primorya*. Diss. Kand. nauk [Metal content of coals from Cenozoic brown coal deposits in Primorye. Cand. Diss.]. St.-Petersburg, 2014. 133 p.
 12. Arbuzov S.I., Finkelman R.B., Il'enok S.S., Maslov S.G., Mezhibor A.M., Blokhin M.G. Modes of occurrence of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) in coals of Northern Asia. *Solid Fuel Chemistry*, 2019, vol. 53, no. 1, pp. 1–21. In Rus.
 13. Wang J., Xiao L., Li P., Arbuzov S. I., Ding S.. Occurrence mode of selected elements in coal of the Ordos Basin. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019, vol. 37, no. 6, pp. 1680–1693.
 14. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregodina E.V. Modes of occurrence of Rare earth elements in peat from Western Siberia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, vol. 184, pp. 40–48.
 15. Seredin V.V. Anomalnye kontsentratsii elementov-primesei v mestorozhdenii germaniya «Spetsugli» (Pavlovskoe burougolnoe mestorozhdenie, Yuzhnoe Primorye). Soobshcheniye 1. Surma [Anomalous trace elements contents in the Spetsugli germanium deposit (Pavlovsk brown coal deposit) Southern Primorye: Communication 1. Stibium]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 2003, no. 2, pp. 1–9.
 16. GOST 9517-94. *Toplivo tverdoe. Metody opredeleniya vykhoda guminyvykh kislot* [State Standart 9517-94. The solid fuel. Methods for determining the yield of humic acids]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov, 1996. 11 p.
 17. GOST 10969-91 (ISO 975-85, ISO 1017-85). *Ugli burye i lignity. Metody opredeleniya vykhoda toluolnogo ekstrakta i soderzhaniya v nem rastvorimykh v atsetone veshchestv (smolistye veshchestva)* [State Standart 10969-91 (ISO 975-85, ISO 1017-85). Brown coals and lignites. Methods for determining the yield of toluene extract and the content of acetone-soluble substances in it (resinous substances)]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1992. 11 p.
 18. 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.
 19. 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 Hu., 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.
 20. 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. *Int. J. of Coal Geology*, 2015, vol. 152, pp. 19–46.
 21. Yudovich Ya.E. Coal inclusions in sedimentary rocks: a geochemical phenomenon. A review. *Int. J. Coal Geology*, 2003, vol. 56, no. 3–4, pp. 203–222.
 22. Sendul'skaya T.I., Shpirt M.Ya. O soosazhdenii mikrokolichestv germaniya s gidrookislyu zheleza [On coprecipitation of germanium trace amounts with iron hydroxide]. *Doklady AN SSSR*, 1960, vol. 134, no. 5, pp. 1108–1110.
 23. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Tsennye elementy-primesi v uglyakh* [Valuable impurity elements in coals]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2006. 538 p.
 24. Yurovskiy A.Z. *Mineralnye komponenty tverdykh goryuchikh iskopaemykh* [Mineral components of solid fossil fuels]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 214 p.
 25. Finkelman R.B., Palmer C.A., Krasnow M.R., Aruscavage P.J., Sellers G.A., Dulong F.T. Combustion and leaching behavior of elements in the Argonne Premium Coal Samples. *Energy Fuels*, 1990, vol. 4, no. 6, pp. 755–766.
 26. Palmer C.A., Krasnow S.R., Finkelman R.B., D'Angelo W.M. An evaluation of leaching to determine modes of occurrence of selected toxic elements in coal. *J. Coal Qual.*, 1993, vol. 12, no. 4, pp. 135–141.
 27. Seredin V.V., Magazina L.O. Mineralogiya i geokhimiya iskopaemoy drevesiny Pavlovskogo burougolnogo mestorozhdeniya (Primore) [Mineralogy and geochemistry of fossil wood of the Pavlovskoe lignite deposit (Primorye)]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1999, no. 2, pp. 158–173.
 28. Lavrik N.A., Litvinova N.M., Van-Van-E A.P. Samorodny volfram i drugie mikromineralnye fazy volframa v burykh uglyakh i zole Ushumunskogo burougolnogo mestorozhdeniya i Cutarskogo proyavleniya (Dalniy Vostok) [Native tungsten and other micro-mineral phases of tungsten in lignite and ash of the Ushumun lignite deposit and the Sutar occurrence (Far East)]. *Voprosy geologii i kompleksnogo osvoeniya prirodnnykh resursov vostochnoy Azii: Tretiya Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya. Sbornik dokladov* [Issues of geology and integrated development of natural resources in East Asia. Proc. of the third All-Russian scientific conference]. Blagoveshchensk, IGIP DVO RAN Publ., 2014. Vol. 1, pp. 120–123.
 29. Lavrik N.A., Litvinova N.M. Mikromineralnaya sostavlyayushchaya burykh ugley i zoly Ushumunskogo i Sutar'skogo mestorozhdeniy (yug Dalnego Vostoka) i perspektivy ispolzovaniya [Micro-mineral component of lignites and ash from the Ushumunskoye and Sutar'skoye deposits (south of the Far East) and prospects for use]. *Vestnik ZabGU*, 2015, vol. 118, no. 3, pp. 38–47.
 30. Vassilev S.V., Eskenazy G.M., Tarasov M.P., Dimov V.I. Mineralogy and geochemistry of vitrain lens with unique trace element content from the Vulche Pole coal deposit, Bulgaria. *Geologica Balcanica*, 1995, vol. 25, no. 3–4, pp. 111–124.
 31. Manskaya S.M., Drozdova T.V. *Geokhimiya organicheskogo veshchestva* [Geochemistry of organic matter]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 315 p.
 32. Zhuang H.P., Lu J.L., Fu J.M., Liu J.Z., Ren C.G., Zou D.G. Germanium occurrence in Lincang superlarge deposit in Yunnan, China. *Sci. China D 41 (Suppl)*, 1998, pp. 21–27.
 33. Bekyarova E.E., Roushev D.D. Forms of binding of germanium in solid fuels. *Fuel*, 1971, vol. 50, pp. 272–279.
 34. Wei Q., Dai S., Lefticariu L., Costin G. Electron probe microanalysis of major and trace elements in coals and their low-temperature ashes from the Wulantuga and Lincang Ge ore deposits, China. *Fuel*, 2018, vol. 215, pp. 1–12.
 35. 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. *Int. J. of Coal Geology*, 2006, vol. 66, pp. 119–136.
 36. *Khimiya i tekhnologiya redkikh i rasseyannykh elementov* [Chemistry and technology of rare and trace elements]. Ed. by K.A. Bolshakova. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976. P. 2, 311 p.

Received: 15 October 2020.

Information about the authors

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

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

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

УДК 624.953

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СТАЛЬНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА ОБЪЕМОМ $V=10000\text{ м}^3$ ДЛЯ НЕФТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Епифанова Екатерина Александровна,
epifanova@tpu.ru

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

Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки новых подходов к оценке и прогнозу конструктивных изменений в пространстве ответственных инженерных сооружений. Решение этой задачи связано с большим количеством неопределенных факторов, таких как неполнота лабораторных данных свойств материалов, а также полевых динамических и статических испытаний подобных сооружений, нехватка аналитической информации и исследований мониторинга. В статье проведен анализ результатов полевых исследований деформаций стального вертикального цилиндрического резервуара объемом $V=10000\text{ м}^3$ для хранения товарной и некондиционной нефти и сопоставление с численным анализом его напряженно-деформированного состояния.

Целью исследования является анализ данных по фактической деформации объекта, полученных в результате наземного лазерного сканирования, и оценки его напряженно-деформированного состояния.

Объект: изменение напряженно-деформированного состояния стального вертикального резервуара объемом $V=10000\text{ м}^3$ для хранения товарной и некондиционной нефти, расположенного на площадке УПН и ГТЭС Сузунского месторождения ООО «РН-Ванкор».

Методика. Исходными данными для моделирования поведения сооружения послужили материалы наземного лазерного сканирования обследованного участка. Напряженно-деформированное состояние сооружения было исследовано при помощи программного комплекса на базе метода конечных элементов. Для оценки изменения пространственно-координатного положения и создания идентичной трехмерной модели объекта исследования применялась технология лазерного сканирования. Сканирование объекта производилось наземным лазерным сканером Leica Scanstation C10, далее массив точек обрабатывался в программном комплексе Leica Cyclone 8.0, определение деформаций резервуара проводилось в программе 3D Reshaper, для анализа напряженно-деформированного состояния изучаемого объекта использовался ANSYS.

Результаты. Оценено напряженно-деформированное состояние резервуара. Создана цифровая расчетная модель. Проведено сравнение результатов моделирования с положением конструкций в пространстве, полученном при лазерном сканировании.

Ключевые слова:

Лазерное сканирование, моделирование, деформации, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

Введение

Важность наблюдений за осадками ответственных инженерных сооружений в эксплуатационный период обусловлена, прежде всего, тем, что анализ результатов наблюдений позволяет дать правильную оценку их технического состояния. Анализ накопленного материала натурных наблюдений позволяет вносить коррективы в теоретические решения, повышая надежность прогноза протекания деформаций во времени. Объективная оценка технического состояния сооружения может быть получена при взаимном рассмотрении нескольких методик наблюдения одновременно: определение фактической геометрии объекта и метода конечных элементов (МКЭ).

В качестве объекта для проведения технического контроля был выбран стальной вертикальный цилиндрический резервуар объемом $V=10000\text{ м}^3$ для хранения товарной и некондиционной нефти, расположенный на площадке УПН и ГТЭС Сузунского месторождения, которое находится в Таймырском Долгано-Ненецком муниципальном районе Красноярского края (рис. 1).

Характеристика природных условий

Административно район работ находится в Таймырском Долгано-Ненецком муниципальном районе Красноярского края на территории Сузунского ме-

сторождения. Расстояние от Игарки до месторождения 130 км (рис. 1), от Дудинки – 160 км, от Нового Уренгоя – 200 км, от Красноярска – 1700 км.

По физико-географическому положению в региональном плане район работ расположен в северо-восточной части Западно-Сибирской низменности.

Район представляет собой низменную полого холмистую равнину со средними абсолютными отметками высоты местности 60...80 м над уровнем моря, расположенную в бассейне реки Солёная, принадлежащую Енисейскому речному бассейну.

Водные объекты на территории обследуемого участка представлены верхними звеньями гидрографической сети реки Солёная, к которым относятся небольшие притоки, ручьи, лога, овраги.

Реки характерно равнинные с неярко выраженными, местами обильно заболоченными долинами, плоскими, часто заболоченными водоразделами. Реки отличаются спокойным течением и высокой степенью извилистости. Суровый климат способствует длительному ледоставу (октябрь–май) и отсутствию стока в зимний период на малых реках.

Наиболее широкое распространение имеют термокарстовые озёра, образовавшиеся в результате изменения термических условий мёрзлых грунтов, а также вытаявания подземных льдов, сопутствующие про-

садками поверхности земли и формированием отрицательных форм рельефа. Они обычно отличаются небольшими размерами и округлыми формами, приурочены в основном к заболоченным поймам рек и

плоским водоразделам. Хотя надо отметить наличие в районе исследований и достаточно крупных озер, достигающих по площади нескольких квадратных километров (оз. Бол. Советское) и глубиной до 30 м.

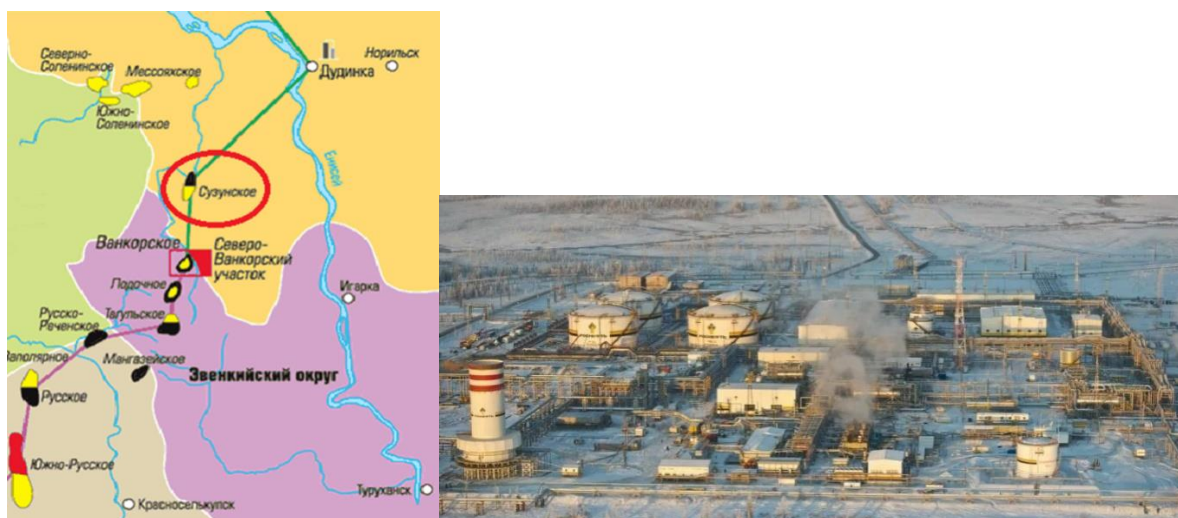


Рис. 1. Сузунское месторождение, район работ обозначен красным контуром, масштаб 1:100000

Fig. 1. Suzunskoye field, the study area – red outline, scale 1:100000

Рельеф территории в его современном виде сформировался в результате процессов морской и ледниковой аккумуляции.

Ледниковая аккумуляция сформировала на существовавшем морском цоколе комплекс форм рельефа ледникового и водно-ледникового происхождения.

Ледниковый тип характеризуется развитием холмисто-грядового рельефа основной морены и озерно-холмистого рельефа краевых образований. Характерным морфологическим признаком этого рельефа является обилие озер различной величины и конфигурации, расположенных в понижениях между беспорядочно разбросанными холмами. Развитие озерных котловин происходит под влиянием термокарстовых процессов. Широко развита заболоченность.

Водно-ледниковый тип рельефа представляет собой задровую равнину с плоской слабонаклонной поверхностью. Волнистый характер поверхности обусловлен чередованием слабовыраженных водоразделов с пологими плохо выраженными склонами и ложбинами стока.

В современную эпоху основными рельефообразующими процессами являются продолжающиеся эрозионно-аккумулятивная речная деятельность и денудация. Существенным фактором рельефообразования является комплекс процессов, связанных с мерзлотой. Криогенные процессы представлены в виде полигональных грунтов, бугров пучения и тундровых медальонов.

В ландшафтном отношении район располагается в пределах южной субарктической кустарниковой тундры. Высота кустарника, произрастающего по долинам рек и вокруг озер, достигает 2–3 м.

Климат района субарктический. Отрицательная среднемесячная температура воздуха держится в течение 8–9 месяцев. Средняя температура января со-

ставляет минус 28°C . Среднегодовая температура воздуха составляет $-10,1^{\circ}\text{C}$. Лето короткое и холодное. Самый теплый месяц лета – июль, имеет среднюю температуру $+12,3^{\circ}\text{C}$. Средние месячные скорости ветра превышают 5 м/с, в целом за год средняя скорость составляет 6 м/с. Наибольшие скорости ветра относятся к осенне-зимнему периоду и достигают в октябре 6,4 м/с. Среднегодовое количество осадков колеблется в пределах 200–250 мм. Снежный покров устанавливается в середине октября, а сходит к концу июня. Реки замерзают в конце сентября – начале октября, а вскрываются в первой половине июня.

В зимнее время преобладают южные ветры. Летом, определяемые влиянием направленности береговой линии со стороны Баренцева и Карского морей, господствуют ветры северных направлений, наибольшую повторяемость имеют северо-восточные ветры. За счет того, что здесь располагается барическая ложбина, простирающаяся от Исландского минимума, в этом районе зимой отмечается усиление циклонической деятельности.

В холодный период года (с октября по апрель–май) проявляется воздействие барических областей, устанавливающихся над северной частью Атлантического океана. В связи с этим зимой, продолжительность которой достигает восьми месяцев, преобладают западные и юго-западные воздушные течения. Они представляют собой поток относительно теплого воздуха, формирующегося над европейским континентом.

С распространением на континент относительно теплых и насыщенных влагой воздушных масс связано установление облачной погоды, выпадение снега, повышение отрицательной температуры воздуха и малое количество солнечной радиации (21 ккал/см^2 в год).

В результате преобладающего северного вторжения арктических масс холодного и сухого воздуха континентального типа в летний период над рассматриваемой территорией устанавливается относительно малооблачная погода антициклонального типа с резким понижением температуры воздуха. В общем для района исследования характерна высокая степень изменения направлений воздушных течений, чем обуславливается неустойчивость погоды в течение всего года.

Исследуемая территория расположена севернее Полярного круга, в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Исключения могут составлять участки, приуроченные к таликовым зонам под крупными реками и под крупными озерными котловинами.

Наземное лазерное сканирование объекта

Для измерений использовался наземный лазерный сканер Leica C10, удовлетворяющий требованиям проекта к точности измерений. Для охвата всей поверхности резервуара съемка выполнялась с нескольких позиций на расстоянии до 25 м от РВС (Резервуар Вертикальный Стальной), с шагом точек от 2 до 4 мм. Результаты сканирования объединялись в специализированной программе Leica Cyclone, где проводилась проверка на отсутствие ошибок съемки для получения максимально точного результата модели сканирования РВС. Данная объединённая точечная модель является исходной для определения деформаций РВС.

Резервуар имеет стационарную сферическую крышу, стенку рулонной сборки, изготовленную в виде четырех полотнищ, которые доставлены к месту строительства свернутыми в рулоны. Краткая характеристика объекта технической экспертизы приведена в табл. 1.

Процесс контроля деформаций резервуара условно делится на два этапа: 1) полевые работы – получение первоначальных сырых данных, геометрических параметров исследуемого объекта в виде облака точек

(рис. 2); 2) камеральные работы – обработка полученной информации в результате полевых работ.

3D сканирование с внешней и внутренней сторон резервуара было выполнено с целью анализа состояния и положения до начала его эксплуатации, с учетом допустимых нормативных отклонений по РД 08-95-95.

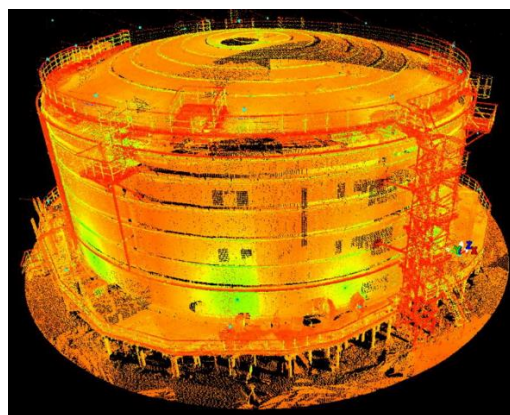
Таблица 1. Краткая характеристика объекта исследования

Table 1. Brief description of the object of study

Параметр резервуара Tank parameter	Параметр согласно проектной документации Parameter according to design documentation
Тип резервуара Tank type	стальной вертикальный цилиндрический резервуар steel vertical cylindrical tank
Номинальный объем, м^3 Nominal volume, м^3	10000
Полезный объем, м^3 Useful volume, м^3	10105
Диаметр, м Diameter, m	34,2
Высота стенки, м Wall height, m	11,92
Наименование продукта Product name	товарная и некондиционная нефть commercial and substandard oil
Марка стали листов Steel grade sheets	09Г2С 09Г2S
Толщина листов стенок, мм Thickness of the sheets of walls, mm	14,0 12,0
Толщина листов кровли, мм Thickness of the roof sheets, mm	6,0
Конструкция днища Bottom construction	полистовая сборка sheet assembly
Конструкция крыши Roof construction	рулонная сборка roll assembly
Место установки Installation location	Сузунское месторождение Suzunskoe field
Нормативный срок эксплуатации резервуара, лет Standard tank life, years	25



а/а



б/б

Рис. 2. РВС: а) вид, б) материалы наземного лазерного сканирования в виде облака точек

Fig. 2. TVS: а) view, б) laser scanning result – point cloud

Сегментирование облака точек. Для получения «чистого» облака точек стенок резервуара была проведена сегментация облака. Сегментированию подлежали попавшие в сектор сканирования предметы (в частности – внешнее оборудование, лестницы), не принадлежащие поверхности стенки резервуара. Эти объекты удалялись с помощью соответствующих инструментов в программе Leica Cyclone Register.

Определение зон деформации стенок резервуара. Для определения зон деформации резервуара по полученному облаку точек была построена триангуляционная модель. По основанию полученной модели было построено горизонтальное сечение и спроецировано на горизонтальную плоскость. В полученную проекцию была вписана окружность и выдавлена

вдоль оси из центра окружности вдоль всей высоты резервуара.

На полученную модель цилиндра накладывается триангуляционная модель резервуара. Отклонения определяются между этими двумя поверхностями.

Полученные данные были представлены в отчётах двух видов.

Сечение идеальной и фактической поверхностей по поясам. Зоны несоответствия двух поверхностей раскрашиваются в соответствии с цветовой картой, диапазон отклонений между идеальной поверхностью и фактической для каждого цвета настраивается исполнителем. По результатам контроля выявлены отклонения от вертикали, образующие стенки сооружения, превышающие предельные значения, в соответствии с требованиями РД 08-95-95.

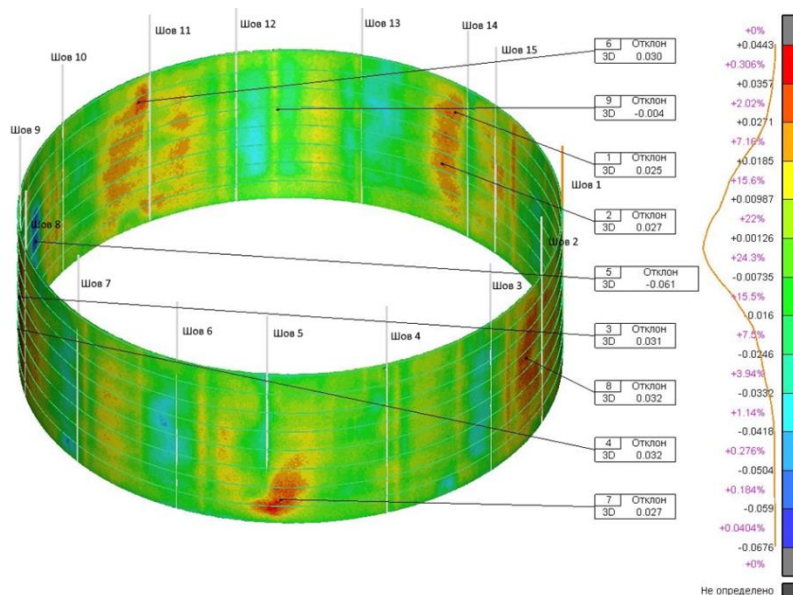


Рис. 3. Цветовая карта отклонений между идеальной поверхностью и фактической

Fig. 3. Color map of deviations between ideal surface and actual

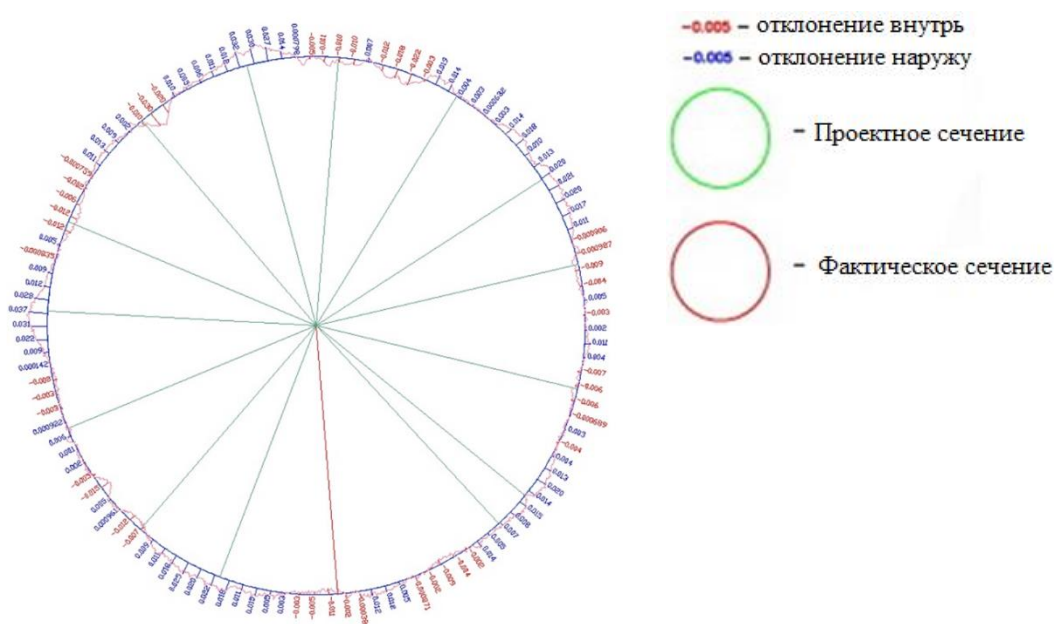


Рис. 4. Определение величин горизонтальных сечений от идеального цилиндра

Fig. 4. Determination of horizontal cross-sections from an ideal cylinder

Определение величины отклонения образующих стенок РВС от вертикали. Для определения величины отклонения образующих стенок РВС от вертикали использовалась специальное программное обеспечение 3D Reshaper, которое позволило автоматизировать вычисления. Вычисление выполнялись с учетом

всего множества измеренных точек, что повысило точность определения по сравнению с точностью единичного измерения. Результаты оформлены в форме графиков и таблиц с указанием допустимых величин отклонений и номера шва, по которому были выполнены вычисления.

Таблица 2. Анализ отклонений стенок резервуара

Table 2. Tank wall deviation analysis

Базовое/Base			Измерение/Unit			Отклонение/Deviation			Отклон. Deviation	Мал. доп. Small addition	Больш. доп. Large addition	Приращение Increment
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
-51,341	17,629	7,859	-51,320	17,614	7,859	0,02	-0,015	0,000	0,025	0,036	-0,059	++++
-50,756	18,487	3,385	-50,733	18,473	3,385	0,023	-0,014	0,000	0,027			++++
-67,542	44,528	4,869	-67,546	44,559	4,869	-0,004	0,031	-0,000	0,031			++++
-67,402	44,542	2,240	-67,406	44,573	2,240	-0,004	0,031	-0,000	0,032			++++
-59,975	43,858	3,594	-59,994	43,800	3,594	-0,019	-0,058	0,000	-0,061			-0,002!
-51,346	37,575	8,185	-51,322	37,592	8,185	0,024	0,017	-0,000	0,030			++++
-82,317	27,671	0,428	-82,344	27,671	0,427	-0,027	0,000	-0,000	0,027			++++
-73,399	12,580	5,182	-73,414	12,552	5,182	-0,015	-0,028	0,000	0,032			++++
-48,182	28,899	5,517	-48,185	28,898	5,517	-0,004	-0,000	-0,000	-0,004			+



Рис. 5. График отклонения от горизонтали днища резервуара

Fig. 5. Graph of deviation from the tank bottom horizontal

В результате выполненных исследований установлены следующие отклонения в изготовленных конструкциях от требований Руководства по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов: полотнище стенки имеет локальное отклонение от проектной формы; выявлены прямолинейные участки полотнищ длиной около 1,5 м; серповидность листов 1-го и 2-го поясов по всей длине полотнища размером 15 мм; вогнутость стенки по всей высоте 43 мм; серповидность листов 1-го и 2-го поясов по всей длине полотнища размером 20–25 мм; полотнище стенки имеет локальное отклонение от проектной формы в виде вогнутости размером 26–30 мм.

Определение напряженно-деформированного состояния элементов конструкции сооружения от действия веса нефтепродуктов

В работах [1–30], рассматривающих численное моделирование поведения грунтовых массивов в резуль-

тате их взаимодействия с различными инженерными сооружениями (железнодорожный мост, метрополитен, подпорная стенка, магистральный трубопровод, историческое здание театра), освещены преимущества использования метода конечных элементов в составлении расчетных моделей при строительстве и реконструкции инженерных сооружений и предотвращении аварийных ситуаций при их эксплуатации.

Расчеты напряженно-деформированного состояния сооружения «Стальной вертикальный цилиндрический резервуар объемом $V=10000 \text{ м}^3$ для хранения товарной и некондиционной нефти, поз. 6.2» выполнены в программном комплексе ANSYS на базе метода конечных элементов.

Расчеты для случая зафиксированных вмятин по ГОСТР 52857.11-2007 «Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости кромок» сов-

пали с точностью 3 % с расчетами по МКЭ. Все «неровности» и выпуклости геометрии листов сооружения получены на основе лазерного сканирования реального объекта.

Максимальные допускаемые напряжения определены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.1-2007 «Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность», ГОСТ Р 52857.11-2007 «Нормы проектирования Стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000–50000 м^3 РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04» (Приложение А $[\sigma] = 193 \text{ МПа}$, Приложение Д $\varphi = 0,65$). Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некрутости кромок» (пункт 5.1.1) и составили

$$\sigma_{\max} \leq 1,5\varphi[\sigma] = 1,5 \cdot 0,65 \cdot 193 = 188,17 \text{ МПа}.$$

Входные данные к расчету представлены в табл. 3.

Таблица 3. Входные данные к расчету

Table 3. Input to the calculation

Характеристика Characteristic	Значение Value
Марка стали/Steel grade	09Г2С 09G2S
Модуль упругости Юнга, МПа Young's modulus of elasticity, MPa	$2,06 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона/Poisson's ratio	0,3
Ускорение свободного падения, м/с^2 Acceleration of gravity, m/s^2	9,81
Высота разлива нефтепродукта, м/Oil spill height, m	10,8
Плотность нефтепродукта, кг/м^3 Density of oil product, kg/m^3	780
Толщина листов днища, мм/Thickness of bottom sheets, mm	8,0
Толщина листов крыши, мм/Thickness of roof sheets, mm	6,0

Каждый вид прочностного расчета был разбит на три этапа: 1 – построение геометрии расчетной 3D модели с требуемыми начальными условиями, границами разбиения и сгущения сетки конечных элемен-

тов, 2 – введение граничных условий и нагружений исходя из постановки задач решения, 3 – в итоге графического представления обрабатывание полученных результатов. С целью уменьшения требуемых расчетных элементов ненагруженные ресурсы конструкции (площадки, подъемные лестницы, трубы, ограждения и т. д.) в численной расчетной модели изменены присоединенными массами, эквивалентными массам указанных элементов. Рассматривались следующие нагружения резервуара: нагрузки от собственного веса конструкции резервуара, гидростатическое давление жидкости нефтепродукта.

Результаты расчета показали, что максимальные напряжения составляют 135 МПа (при допустимых напряжениях = 188,17 МПа).

На рис. 7 представлена картина распределения общих перемещений в листах резервуара. Из расчета видно, что величина общих перемещений не превышает 29 мм. В результате расчета необходимо получить значения перемещений листов поясов и картину их напряжений в радиальном направлении. Для этого в решении была введена дополнительная цилиндрическая система координат. Перемещение листов поясов в радиальном направлении не превышает 3 мм. Значения напряжений составили порядка 90 МПа. Общие деформации в металле поясов резервуара, рассчитанные по критерию Мизеса, – в пределах 2 мм.

Выводы

1. В процессе монтажа, по результатам геодезических измерений, в соответствии с исполнительными схемами, а также с руководством по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов отклонений от проекта не выявлено.

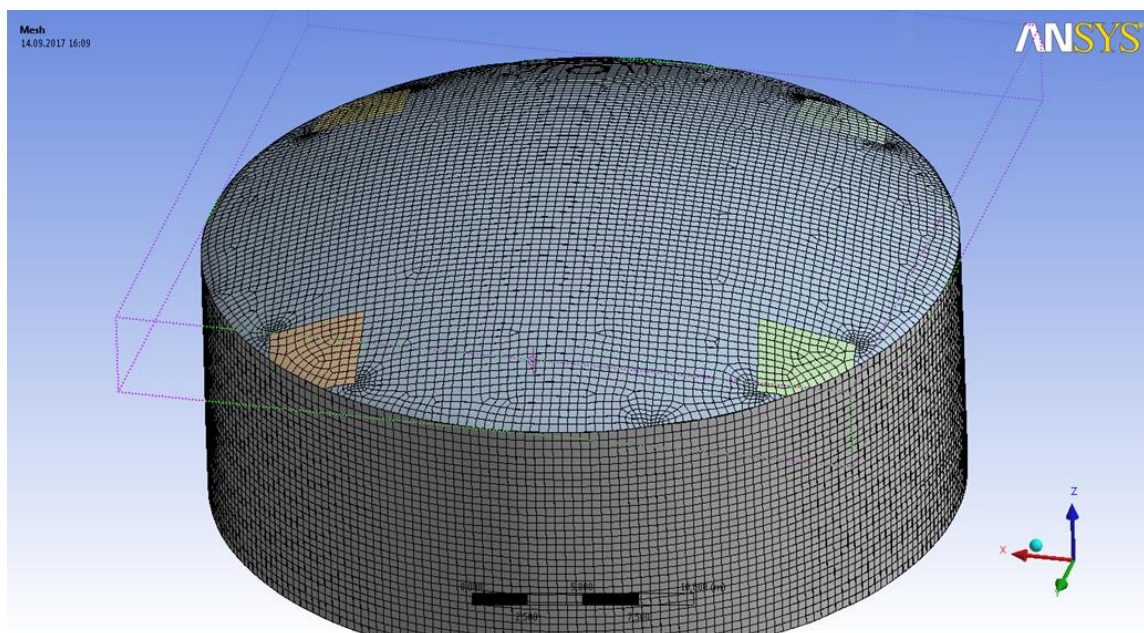


Рис. 6. Конечно-элементная модель резервуара

Fig. 6. Finite element model of the tank

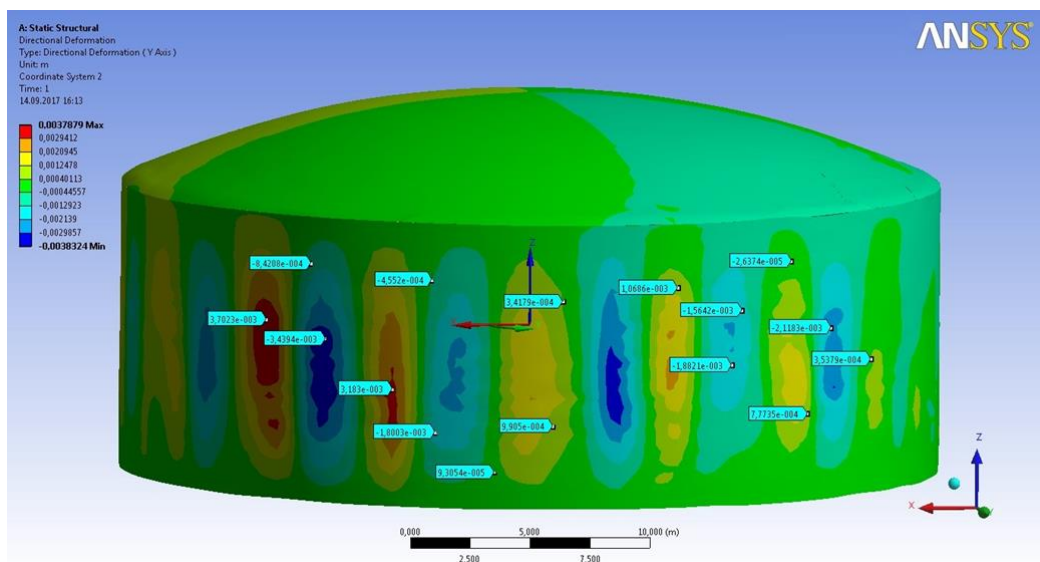


Рис. 7. Картина полей общих перемещений резервуара
 Fig. 7. Picture of general displacement fields of the tank

2. По результатам проведенного наземного лазерного сканирования с внешней и внутренней сторон по полученным материалам сканирования обнаружены вертикальные отклонения стен сооружения, превышающие предельные значения, в соответствии с требованиями РД 08-95-95.

3. По результатам расчета напряженно-деформированного состояния элементов сооружения в программном комплексе ANSYS установлено, что максимальные напряжения для элементов резервуара составляют 135 МПа при допустимых напряжениях 188,17 МПа; эксплуатация резервуара возможна на проектных параметрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Светашков А.А., Куприянов Н.А., Манабаев К.К. Приближенный алгоритм решения задач линейной вязкоупругости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 292–299.
2. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 618 с.
3. Field and laboratory studies on high-mast lighting towers in Iowa / R.J. Connor, G. Callahan, M. Koob, I.C. Hodgson, B.L. Brakke // Proc. of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium. – Ames, Iowa, August 2007. – 16 p.
4. Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: Fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire / Y. Li, J. Jiang, Q. Zhang, (...), H. Liu, C.-M. Shu // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – V. 127. – P. 23–35.
5. Pantousa D., Godoy L.A. On the mechanics of thermal buckling of oil storage tanks // Thin-Walled Structures. – 2019. – V. 145. – № 106432.
6. Failure analysis of a high mast lamp post / G. Das, S. Chakrabarty, A.K. Dutta, S.K. Das, K.K. Gupta, R.N. Ghosh // Engineering Failure Analysis. – 2006. – V. 13 (17). – P. 1153–1158.
7. Sherman R.J., Hebdon M., Connor R. Fatigue testing and retrofit details of high-mast lighting towers // Engineering Journal (American Institute of Steel Construction). – 2016. – V. 53 (1). – P. 61–72.
8. Goode J.S., Van de Lindt J.W. Reliability-based design of medium mast lighting structural supports // Structure and Infrastructure Engineering. – 2013. – V. 9 (6). – P. 594–600.
9. Селезнева Е.В. Применение лазерного сканирования в геоморфологических исследованиях // Вестник МГУ. Сер. 5. – 2013. – № 2. – С. 47–53.
10. Комиссаров А.В., Широкова Т.А., Комиссаров Д.В. Общий подход к изучению погрешностей наземной лазерной съемки, вызванных метрологическими свойствами объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
11. Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures / H. Yang, M. Omidalizari, X. Xu, I. Neumann // Composite Structures. – 2016. – V. 149. – P. 93–105.
12. Use of terrestrial laser scanning technology for long term high precision deformation monitoring / R. Vežočnik, T. Ambrožič, O. Sterle, G. Bilban, N. Pfeifer, B. Stopar // Sensors. – 2009. – № 9. – P. 9873–9895.
13. Lichti D.D. A method to test differences between additional parameter sets with a case Photogrammetry and Remote Sensing // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2008. – V. 63 (2). – P. 169–180.
14. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanning-based updating of a finite element model for structural health monitoring // IEEE Sensor. – 2016. – V. 7. – P. 2100–2104.
15. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings / G. Vacca, F. Mistretta, F. Stochino, A. Dessi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2016. – V. 41. – Iss. B5. – P. 453–460.
16. Xu X., Yang H., Neumann I. Time-efficient filtering method for three-dimensional point clouds data of tunnel structures // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10 (5). – P. 1–6.
17. СП 43.13330.2012. Акту. ред. СНиП 2.01.03-85. Сооружение промышленных предприятий. – М.: Стандартинформ, 2012. – 106 с.
18. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций/Гострой России. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2004. – 131 с.
19. СП 20.13330.2016. Акту. ред. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 104 с.
20. СП 16.13330.2011. Акту. ред. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: Стандартинформ, 2011. – 178 с.
21. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.

22. Ганова С.Д. Геоэкологические аспекты создания и функционирования природно-технических систем в условиях криолитозоны Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2017. – № 5. – С. 58–64.
23. 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.
24. 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.
25. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндынское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – № 4. – Т. 326. – С. 41–55.
26. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 59–68.
27. 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.
28. Stroková L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – 6 p.
29. Purgina D.V., Stroková L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33. – 6 p.
30. Численное моделирование влияния упрочнения грунтового массива цементно-песчаной инъекцией на деформации основания / Л.А. Строкова, С.С.Т. Тарек, В.В. Голубева, В. Иванов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 6–17.

Поступила: 09.04.2020 г.

Информация об авторах

Епифанова Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, инженер, Инженерная школа новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.953

DEFINITION OF DEFORMATIONS OF STEEL VERTICAL CYLINDRICAL RESERVOIR WITH VOLUME OF $V=10000 \text{ m}^3$ FOR OIL USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

Ekaterina A. Epifanova,
epifanova@tpu.ru

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

The relevance of the topic is caused by the need to develop new approaches to assessing and forecasting structural changes in the space of critical engineering structures. The solution to this problem is associated with a large number of uncertain factors, such as incomplete laboratory data on the properties of materials, as well as field dynamic and static tests of such structures, lack of analytical information and monitoring studies. The article analyzes the results of field studies of deformations of a steel vertical cylindrical tank with a volume of $V=10000 \text{ m}^3$ for storage of salable and substandard oil and compares it with a numerical analysis of its stress-strain state.

The purpose of the study is to analyze the data on the actual deformation of the object obtained as a result of terrestrial laser scanning, and assess its stress-strain state.

The object of the study is the change in the stress-strain state of a steel vertical tank with a volume of $V=10000 \text{ m}^3$ for storage of salable and substandard oil located on the site of the oil treatment facility and gas turbine power plant of the Suzunskoe field of LLC RN-Vankor.

Methods. The initial data for modeling the behavior of the structure were materials of terrestrial laser scanning of the examined area. The stress-strain state of the structure was investigated using a software package based on the finite element method. Laser scanning technology was used to assess changes in the spatial-coordinate position and construct an accurate 3D model of the observation object. The object was scanned with a Leica Scanstation C10 terrestrial laser scanner, then the point cloud was processed in the Leica Cyclone 8.0 software package, the determination of the reservoir deformations was carried out in the 3D Reshaper software, ANSYS was used to analyze the stress-strain state of the object under study.

The results. The stress-strain state of the reservoir is estimated. A digital calculation model was created. The simulation results are compared with the position of the structures in the space obtained by laser scanning.

Key words:

Laser scanning, modeling, deformation, stress-strain state, finite element method.

REFERENCES

1. Svetashkov A. A., Kupriyanov N. A., Manabaev K. K. An approximate algorithm for solving the problems of linear viscoelasticity. *Computational continuum mechanics*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 292–299. In Rus.
2. Perelmutter A.V., Slivker V.I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Calculation models of structures and possibilities of their analysis]. Moscow, DMK Press Publ., 2002, 618 p. In Rus.
3. Connor R.J., Callahan G., Koob M., Hodgson I.C., Brakke B.L. Field and Laboratory Studies on high-mast lighting towers in Iowa. *Proc. of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium*. Ames, Iowa, August 2007. 16 p
4. Li Y., Jiang J., Zhang Q., Liu H., Shu C.-M. Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, vol. 127, pp. 23–35.
5. Pantousa D., Godoy L.A. On the mechanics of thermal buckling of oil storage tanks. *Thin-Walled Structures*, 2019, vol. 145, no. 106432.
6. Das G., Chakrabarty S., Dutta A.K., Das S.K., Gupta K.K., Ghosh R.N. Failure analysis of a high mast lamp post. *Engineering Failure Analysis*, 2006, vol. 13 (17), pp. 1153–1158.
7. Sherman R.J., Hebdon M., Connor R. Fatigue testing and retrofit details of high-mast lighting towers. *Engineering Journal (American Institute of Steel Construction)*, 2016, vol. 53 (1), pp. 61–72.
8. Goode J.S., Van de Lindt J.W. Reliability-based design of medium mast lighting structural supports. *J. Structure and Infrastructure Engineering*, 2007, vol. 9, no. 6, pp. 594–600.
9. Selezneva E.V. Application of laser scanning in geomorphologic studies. *MSU Vestnik. Series 5*, 2013, vol. 2, pp. 47–53. In Rus.
10. Komissarov A.V., Shirokova T.A., Komissarov D V. The general approach to the study of errors of terrestrial laser shooting caused by metrological properties of objects. *Izvestiya vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*, 2013, no. 1, pp. 36–42. In Rus.
11. Yang H., Omidalizarandi M., Xu X., Neumann I. Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures. *Composite Structures*, 2016, vol. 149, pp. 93–105.
12. Vezočnik R., Ambrožič T., Sterle O., Bilban G., Pfeifer N., Stopar B. Use of terrestrial laser scanning technology for long term high precision deformation monitoring. *Sensors*, 2009, no. 9, pp. 9873–9895.
13. Licht D.D. A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, vol. 63, no. 2, pp. 169–180.
14. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanning-based updating of a finite element model for structural health monitoring. *IEEE Sensor*, 2016, no. 7, pp. 2100–2104.
15. Vacca G., Mistretta F., Stochino F., Dessi A. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, vol. 41, Iss. B5, pp. 453–460.
16. Xu X., Yang H., Neumann I. Time-efficient filtering method for three-dimensional point clouds data of tunnel structures. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (5), pp. 1–6.
17. SP 43.13330.2012 Act. ed. SNiP 2.01.03-85. *Sooruzhenie promyshlennykh predpriyatiy*. [The construction of industrial enterprises]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 106 p.
18. SP 53-102-2004. *Obshchie pravila proyektirovaniya stalnykh konstruktov* [General rules for the design of steel structures]. Moscow, TSNIISK im. Kucherenko Publ., 2004. 131 p.
19. SP 20.13330.2016 Act. ed. SNiP 2.01.07-85*. *Nagruzki i vozdeystviya* [Loads and impacts]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 104 p.
20. SP 16.13330.2011. Act. ed. SNiP II-23-81*. *Stalnye konstruktii. Normy proyektirovaniya* [Steel structures. Design Standards]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 178 p.
21. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 6 p.
22. Ganova S.D. Geoeological aspects of the creation and functioning of the natural- technical systems under the conditions of the of

- Western Siberia cryolithic zone. *Proceedings of Higher Schools. Geology and exploration*, 2017, vol. 5, pp. 58–64. In Rus.
23. Epifanova E.A., Strokova L.A. Evaluation of deformation of a historic building in Tomsk by an integrated approach based on Terrestrial Laser Scanner and Finite Element Modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 27–41. In Rus.
24. Epifanova E.A., Strokova L.A. Numerical analysis of deformation of the lighting mast by ground laser scanner and finite element method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 7–17. In Rus.
25. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoe oil and gas field – Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.
26. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 59–68. In Rus.
27. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.
28. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016, Vol. 43, 012051.
29. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 01246.
30. Strokova L.A., Tarek S.S.T., Golubeva V.V., Ivanov V. Numerical modeling of influence of soil mass reinforcement with cement-sand grouting on foundation deformation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 6–17. In Rus.

Received: 9 April 2020.

Information about the authors

Ekaterina A. Epifanova, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276:004.896

ГЛУБОКИЕ ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗНАЧЕНИЙ ДЕБИТОВ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

Евсюткин Иван Викторович¹,
ive1@tpu.ru

Марков Николай Григорьевич¹,
markovng@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поддержки принятия решения специалистами добывающих предприятий нефтегазовой отрасли при управлении производством. Точное прогнозирование значений дебитов добывающих скважин позволяет определить такие технологические режимы работы фонда скважин и технологического оборудования, которые позволят достичь заданного объёма выпуска продукции. Существующие методы не всегда обеспечивают требуемый уровень точности при прогнозе значений дебитов скважин, что приводит к ошибкам при расчёте экономического эффекта при оценке рентабельности добывающих скважин и последующих поставок углеводородного сырья, а также при учёте ограничений, накладываемых органами надзора за использованием недр.

Цель: разработать и предложить наиболее эффективные модели глубоких искусственных нейронных сетей при прогнозе значений компонентов добычи углеводородного сырья – нефти, газа, жидкости (газового конденсата) и воды.

Объекты: технологические параметры дебитов добывающих скважин фонда нефтяных, газовых, нефтегазовых и нефтегазоконденсатных месторождений.

Методы: методы анализа больших объёмов технологических данных скважин, развиваемые в соответствии с концепцией «Big Data»; модели глубоких искусственных нейронных сетей; объектно-ориентированное программирование; методы оценки и статистического анализа результатов исследований эффективности глубоких искусственных нейронных сетей при прогнозе значений дебитов добывающих скважин.

Результаты. Разработана методика подготовки данных по дебитам скважин для обучения и тестирования глубоких искусственных нейронных сетей прямого распространения. Проведены исследования различных архитектур таких нейросетей при решении задач прогноза дебитов нефти, газа, жидкости (газового конденсата) и дебита воды. Выявлены наиболее эффективные архитектуры глубоких нейросетей прямого распространения. Такие нейронные сети позволяют увеличить точность прогноза в два и более раза по сравнению с точностью прогноза, даваемой традиционным методом экстраполяции по скользящей средней.

Ключевые слова:

Месторождение нефти и газа, добывающая скважина, прогноз значений дебитов скважин, модели глубоких искусственных нейронных сетей, исследование эффективности глубоких нейронных сетей прямого распространения.

Введение

При добыче углеводородного сырья (УВС) на промыслах происходит измерение большого числа технологических и геологических параметров. Значения этих параметров служат для оценки состояния скважин и продуктивных пластов, а также позволяют понять, какова технологическая и экономическая эффективность проведённых работ на фонде скважин, в том числе и геолого-технических мероприятий (ГТМ).

Задача прогноза значений параметров актуальна не только для расчёта технологических режимов скважин, но и для управления фондом скважин, так как выявленный критический тренд может позволить заранее установить необходимость проведения определённого вида ГТМ на скважине [1]. Однако существующие методы прогноза значений дебитов скважины в лучшем случае позволяют выполнить экстраполяцию данных путём линейной регрессии [2, 3]. Разумеется, столь простые методы не способны учесть множество аспектов, заложенных в данных, и взаимовлияние их друг на друга в рамках получаемых временных рядов для параметров скважин [4]. Соот-

ветственно, точность прогноза не всегда удовлетворяет специалистов нефтегазодобывающих предприятий. Сделаны первые шаги в использовании методов интеллектуального анализа данных при решении таких задач, давшие первые обнадеживающие результаты [5–7].

Всё это указывает на актуальность разработки новых методов интеллектуального анализа данных, позволяющих существенно повысить точность прогноза значений параметров скважин и продуктивных пластов.

В данной работе для прогноза значений дебитов скважин было предложено использовать глубокие искусственные нейронные сети (ИНС) [8], показавшие свою эффективность при решении задач экстраполяции данных в других предметных областях. Проведено исследование эффективности различных архитектур глубоких ИНС прямого распространения при решении таких задач прогноза. Результаты исследований показали, что использование этих ИНС позволяет значительно повысить точность прогноза значений дебитов скважин по сравнению с точностью, достигаемой с помощью известных методов.

Постановка задачи исследования

Целью планирования работы производства нефтегазодобывающего предприятия является определение таких технологических режимов работы фонда скважин и технологического оборудования, которые позволят достичь заданного объёма выпуска продукции (нефти, газа и газового конденсата). При этом наиболее важно планирование технологических режимов каждой добывающей скважины фонда и технологических режимов установок подготовки продукции из добываемого УВС, а также планирование режимов транспортировки продукции до магистральных нефте- и газопроводов.

Обычно на эксплуатируемых месторождениях прогнозу подлежит довольно большое число измеряемых параметров добывающих скважин и продуктивных пластов, среди них: дебит нефти, дебит газа, дебит жидкости (конденсата), дебит воды, давление забойное, давление пластовое, обводнённость и т. д. Однако наиболее востребованными являются прогнозы значений дебитов скважин.

Точное предсказание дебитов скважин является необходимой частью управления производством любого нефтегазодобывающего предприятия. Важно прогнозировать (планировать) дебиты не просто на конкретный день, а на определённый промежуток времени (например, равный месяцу), чтобы понимать, сколько в среднем УВС будет добываться из скважины в сутки. В этом случае говорят о планировании технологического режима скважины. Значение технологического режима скважины позволяет рассчитать экономический эффект от добычи УВС и понять рентабельность эксплуатации конкретной скважины, построить перспективные планы поставок продукции и учесть ограничения, наложенные органами надзора за пользование недрами [9].

Для обеспечения высокой точности прогноза значений дебитов скважины было предложено использовать глубокие ИНС прямого распространения. Поэтому была поставлена задача исследования эффективности таких ИНС при решении задачи прогноза значений дебитов при использовании реальных данных с эксплуатируемого месторождения.

Для проведения исследований использовался архив данных одного из нефтегазоконденсатных месторождений Томской области, где за 6 лет эксплуатации накоплен значительный объём данных. Фонд добывающих скважин содержит 17 кустов скважин, в каждом кусте от 6 до 21 добывающей скважины, всего 142 добывающих скважины.

Для экспериментов были выбраны исключительно параметры типа дебитов (ежесуточные объёмы добычи компонентов УВС – нефти, воды и т. д.), так как они являются наиболее значимыми интегральными показателями добычи УВС. Для них в базе данных (БД) предприятия обычно имеется наибольший объём данных, не является исключением и предприятие, из архива которого были взяты данные для исследований.

Методика подготовки данных для обучения и тестирования искусственных нейронных сетей

На предприятии использовалась методика прогноза (планирования) значений дебитов, основанная на методе экстраполяции по скользящей средней [10, 11]. Для каждого из дебитов скважин в анализируемой БД имеются прогнозные и фактические значения. Прогноз геологической службой предприятия, судя по имеющимся данным, осуществлялся от –8 до 229 дней до измерения фактического значения дебита. То есть в БД имеются явно ошибочные значения параметров, по крайней мере, при планировании значений дебитов, так как нельзя планировать значение параметра уже после получения его фактического значения. Также вызывают сомнения прогнозы на большие временные промежутки (на 2 и более месяцев). Все такие данные отбраковывались и в экспериментах не использовались [12].

Все фактические измеренные значения дебитов на дату планирования и ранее подаются на входы ИНС (признак, англ. feature). Фактические значения дебитов через месяц после этой даты являются эталоном, то есть они служат эталоном выходным значениям ИНС (метка, англ. label) при её обучении и тестировании.

Данные, которые находятся между датой планирования и более поздней датой получения фактического значения дебита-эталона, не используются, несмотря на их наличие в БД, чтобы находиться в тех же самых условиях, что и находилась геологическая служба предприятия, планировавшая технологический режим работы скважины. Это позволит корректно осуществить сравнение полученных при исследовании результатов с имеющимися в БД значениями прогнозных (плановых) дебитов.

При проведении экспериментов было решено брать значения дебитов от даты планирования в течение трёх–пяти недель до получения фактического значения. Это практически важно при формировании технологических режимов скважин. Исходное число записей в БД 17117, после сужения периода планирования до заданного записей осталось 13032. Видно, что такие действия уменьшили объём обучающей выборки. Однако это позволило нам получить более точную оценку результатов прогноза значений дебитов на месяц по существующей на предприятии методике.

Число анализируемых записей и рассчитанные нами значения взвешенных средних абсолютных ошибок (англ. Weighted absolute percent error – WAPE) [13] при прогнозе каждого параметра (вида дебита) по всему месторождению по методике предприятия указаны в табл. 1. При разработке наших моделей ИНС и при оценке их точности необходимо ориентироваться на уменьшение WAPE при прогнозе значений этих дебитов.

Текущий или капитальный ремонт скважин, остановка их по другим причинам или на проведение ГТМ вносят непредсказуемость в изменение параметров скважин. Это должно быть учтено при составлении обучающих примеров, чтобы в вектор признаков на входах ИНС по каждой скважине не попадали зна-

чения дебитов одновременно до и после проведения тех или иных ГТМ или остановок скважин. То есть планирование технологического режима скважины должно осуществляться исключительно с учетом периодов её эксплуатации.

Таблица 1. Оценки точности прогноза параметров по методике предприятия

Table 1. Estimates of the forecasting precision of parameters by the enterprise method

Название параметра Name of parameter	Обозначение Designation	Единица измерения Measuring unit	Число записей Record count	Взвешенная средняя абсолютная ошибка, % Weighted absolute percent error, %
дебит нефти debit of oil	Q_n Q_o	т/сут tons/day	3557	27,347
дебит газа debit of gas	Q_g Q_z	тыс. м ³ /сут 1000 m ³ /day	3458	35,133
дебит жидкости debit of fluid	$Q_{ж}$ Q_f	м ³ /сут m ³ /day	3459	26,734
дебит воды debit of water	Q_a Q_w	т/сут tons/day	2558	67,044

Не ясно, какое оптимальное число значений дебита нужно подавать на входы ИНС, это предстоит определить экспериментально. Также открытым остаётся вопрос, стоит ли подавать на входы ИНС значения только одного какого-либо дебита или добавлять к ним ещё значения других параметров, например,

дебита другой компоненты УВС или пластового давления продуктивного пласта. Так как число таких сочетаний очень велико, подобные эксперименты не выполнялись, и в качестве входных значений для ИНС использовались только фактические значения прогнозируемого дебита.

Суть предлагаемой методики подготовки данных в том, чтобы увеличивать при прогнозе число входных значений дебитов для ИНС за счёт расширения числа известных из БД фактических значений дебитов от 6 (6 дней назад от даты планирования) с постепенным добавлением таких значений за предыдущие дни до 15. Схематично процесс выбора данных изображён на рис. 1, где показано движение скважины во времени. Видно, что скважина была два раза остановлена на разные промежутки времени. Жирными красными штрихами отмечены взятые в эксперимент 13 фактических значений дебита на скважине, получаемые ежедневно. Пусть дата прогноза значения дебита будет отмечена знаком «!» (метка для ИНС), и на эту дату в БД должно быть фактическое значение дебита. Дата, с которой планируется значение дебита, показана знаком «?». С даты планирования и по дату прогноза должен пройти один месяц (период планирования). Все фактические значения дебита (от 6 до 15 значений) до даты планирования становятся признаками, подаваемыми на входы ИНС (отмечены жирными красными штрихами).

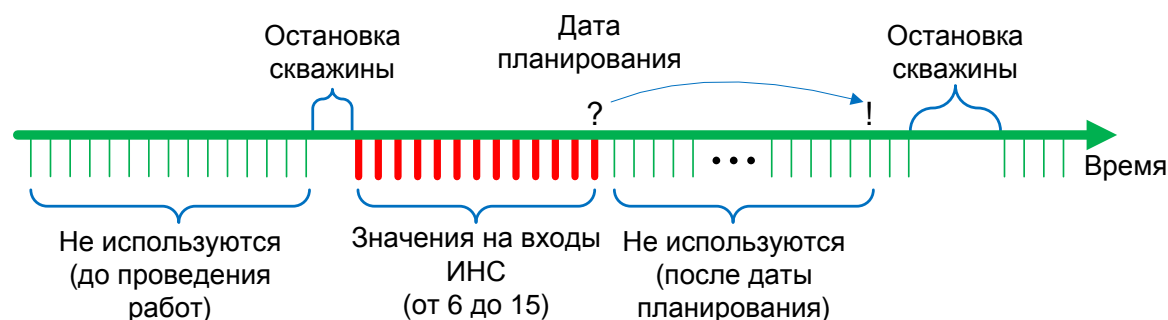


Рис. 1. Схема выбора значений измеряемых дебитов

Fig. 1. Selection scheme of values for the measured debits

Дате планирования может предшествовать остановка скважины для проведения каких-либо работ (например, ГТМ). Поэтому число признаков для ИНС, большее некоторого имеющегося числа, взять не получится. Например, из рис. 1 следует, что выбрать 14 признаков не удастся. Это значит, что в общем случае обучающие выборки будут несопоставимы по объёму, так как для малого числа признаков на входах ИНС (например, 6) будет всегда больше обучающих примеров, чем для большого числа признаков (например, 15).

Если за какой-либо день в БД отсутствует фактическое значение дебита, и это не связано с проведением работ на скважине, то производится линейная интерполяция значения дебита по соседним известным значениям. Использование линейной интерполяции было продиктовано разработчиками БД.

Если между двумя остановками скважины есть только одно измерение дебита, или оно вообще отсутствует, то в таких условиях провести интерполяцию нельзя, и прогноз на этом интервале становится невозможным [14]. Если на скважине ГТМ не проводились, то берётся весь массив значений фактических дебитов для анализа без каких-либо ограничений. Аналогичным образом для анализа используются все значения параметров после последнего проведённого ГТМ на скважине.

Для извлечения данных о дебитах и остановках скважин, в том числе для ГТМ, из БД было создано специальное программное обеспечение (ПО). Данное ПО позволяет провести всю необходимую предварительную обработку данных, выбрать вид дебита (дебит нефти, газа, жидкости (газового конденсата) или воды), число признаков на входе ИНС (от 6 до 15),

указать число блоков для кросс-валидации данных методом K блоков [15], а также создать файл для последующего обучения или тестирования ИНС. Пользователь видит при загрузке данных информацию о характеристиках выборки в текстовом поле. При формировании файла указывается, сколько было задействовано скважин при построении выборки и общее число обучающих и тестовых примеров.

Для проведения экспериментов с помощью этого ПО было построено 40 пар файлов (для обучения и тестирования ИНС) – по 10 пар на каждый вид дебита. Объёмы пар «признаки–метка» для разного числа входов ИНС и для всех дебитов указаны в табл. 2. При использовании метода K блоков выбрано K=5. Это означает, что все вычисленные в ходе исследования итоговые значения WAPE прогноза дебитов являются результатом усреднения по пяти значениям ошибок, полученным в ходе обучения и тестирования ИНС.

Таблица 2. Объёмы выборок для различных дебитов и разного числа входов искусственной нейронной сети

Table 2. Volumes of selections for various debits and different number of artificial neural network inputs

Дебиты Debits	Число входов ИНС Number of ANN inputs									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Q_n Q_o	1248	1248	1246	1246	1244	1244	1243	1243	1243	1235
Q_r Q_g	1199	1199	1197	1197	1195	1195	1194	1194	1194	1188
Q_w Q_f	1199	1199	1197	1197	1195	1195	1194	1194	1194	1188
Q_n Q_w	880	877	875	875	873	873	872	872	872	868

Эксперименты по прогнозу значений дебитов скважин

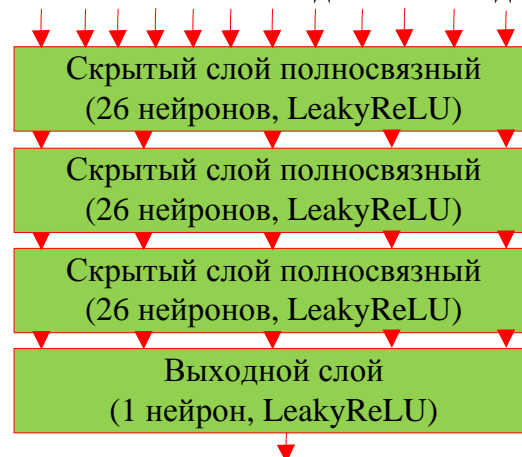
Программная реализация ИНС для проведения экспериментов выполнена на языке C# с использованием библиотеки Microsoft CNTK [16], имеющей определённые преимущества перед другими библиотеками [17, 18]. С её помощью были автоматизированы операции по изменению архитектуры и гиперпараметров ИНС, обучены и протестированы ИНС на вышеуказанных выборках.

Число скрытых слоёв ИНС прямого распространения выбиралось равным 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15. В ходе экспериментов было выявлено, что число слоёв больше восьми не даёт прироста точности прогноза. Исследовалось также применение различных функций активации (TanH, LeakyReLU) [19], позволяющих получать связи между нейронами с отрицательными воздействиями. Алгоритм оптимизации при обучении ИНС Adam [20]. Скорость обучения динамически определялась по этому алгоритму. Каждый обучающий пример уникален и должен осуществлять воздействия индивидуально, но скорость обучения тем больше, чем меньше объём минивыборки, поэтому был выбран компромиссный вариант, равный 5. Число эпох выбиралось динамически, в соответствии с достигаемой точностью

обучения, если она несколько эпох существенно не менялась. Число нейронов в каждом скрытом слое выбиралось в соответствии с эвристическим правилом: $Число\ Нейронов = Число\ Входов * 2 + 2$.

На входы ИНС подаются фактические значения дебита за определённое число дней (от 6 до 15). Далее идёт ряд скрытых слоёв ИНС – от 2 до 8. В выходном слое ИНС один нейрон (прогнозируемое значение дебита). На рис. 2 в качестве примера приведена архитектура ИНС с 3 скрытыми слоями, 12 фактическими значениями дебита на входах ИНС и 26 нейронами в скрытых слоях, функция активации LeakyReLU.

Фактические значения дебита за 12 дней



Прогнозное значение дебита

Рис. 2. Схема архитектуры искусственной нейронной сети
Fig. 2. Architecture scheme of an artificial neural network

В табл. 3 приведены в качестве примера результаты экспериментов с ИНС различных архитектур при решении на тестовых выборках задачи прогноза значений дебита нефти Q_n . При этом переменными являются как функции активации и число скрытых слоёв ИНС, так и число входов ИНС. Значение ошибки прогноза вычисляется как среднее по всем ошибкам, полученным по схеме кросс-валидации по 5 блокам, и по всем ошибкам для добывающих скважин в выборках. Жирным отмечается лучшая точность, результаты округлены до тысячных. Аналогичные эксперименты на тестовых выборках были проведены для дебитов газа, жидкости и воды, их результаты сведены в три таблицы.

Такие же четыре таблицы содержат результаты прогноза значений дебитов в случае обучающих выборок. Отметим, что значения WAPE на обучающих выборках меньше до 30 % по сравнению с ошибками, полученными с помощью ИНС на тестовых выборках. Причём чем больше число входов и число слоёв ИНС, тем меньше разница WAPE, полученных на обучающей и тестовой выборках.

Лучшие результаты из всех четырёх таблиц со значениями WAPE при прогнозе дебитов, полученные при исследованиях ИНС с различными архитектурами на тестовых выборках, занесены в табл. 4.

Сравнительный анализ лучших результатов из табл. 4 с WARE прогноза из табл. 1 показал, что для каждого из дебитов точность прогноза с помощью ИНС выше, чем полученная с помощью метода экстраполяции по скользящей средней. Прирост точности прогноза дебитов с помощью ИНС указан для тестовых выборок

в сравнении с результатами из табл. 1 в последнем столбце табл. 4. Видно, что лучший результат прогноза каждого из дебитов, полученный с использованием ИНС, в два и более раза точнее, чем результат прогноза каждого из дебитов по методике, принятой на предприятии.

Таблица 3. Результаты прогноза Q_n с помощью искусственной нейронной сети на тестовых выборках

Table 3. Results of forecasting Q_o by means of artificial neural network on test selections

Параметр Parameter	Число входов ИНС Number of ANN inputs	Функция активации Activation function	Взвешенная средняя абсолютная ошибка, % Weighted absolute percent error, %						
		Число слоёв Number of layers	2	3	4	5	6	7	8
Q_n Q_o	6	TanH	16,705	16,841	17,775	15,163	16,695	17,893	16,705
		LeakyReLU	20,538	17,978	18,385	16,645	18,146	17,445	20,538
	7	TanH	18,197	17,723	17,356	17,617	15,420	17,109	18,197
		LeakyReLU	18,545	17,942	17,563	17,500	17,123	15,777	18,545
	8	TanH	16,282	17,384	17,141	17,147	20,219	19,081	16,282
		LeakyReLU	16,993	17,496	17,621	16,837	16,168	17,370	16,993
	9	TanH	16,551	17,380	17,356	18,837	17,678	15,810	16,551
		LeakyReLU	17,040	18,290	16,720	18,991	15,858	15,467	17,040
	10	TanH	14,127	14,674	12,623	13,296	13,985	14,523	13,298
		LeakyReLU	13,889	13,849	12,477	13,337	13,456	13,351	13,768
	11	TanH	13,236	12,794	14,579	14,174	13,643	16,728	13,236
		LeakyReLU	13,718	13,463	13,680	12,685	13,222	13,438	13,718
	12	TanH	15,568	16,006	15,149	17,024	16,967	16,413	15,568
		LeakyReLU	15,858	15,660	15,712	15,617	16,456	15,315	15,858
	13	TanH	16,869	15,179	15,378	16,124	16,000	16,430	16,869
		LeakyReLU	16,541	15,398	14,602	15,631	14,332	15,240	16,541
	14	TanH	15,637	15,179	15,962	15,968	16,270	16,099	15,637
		LeakyReLU	17,494	15,988	14,995	15,611	14,843	15,019	17,494
	15	TanH	15,360	15,224	14,962	17,200	15,052	15,123	15,360
		LeakyReLU	15,372	14,731	14,427	14,756	14,050	13,868	15,372

Таблица 4. Лучшие результаты при прогнозе значений дебитов скважин с помощью искусственной нейронной сети

Table 4. The best results at forecasting of wells debit values by means of artificial neural network

Параметр Parameter	Взвешенная средняя абсолютная ошибка, % Weighted absolute percent error, %	Особенности архитектуры ИНС Features of ANN architecture	Прирост точности прогноза, % Boost of the forecasting precision, %
Q_n Q_o	12,477	10 входов ИНС; 4 скрытых слоя; функция активации LeakyReLU 10 inputs of ANN; 4 hidden layers; activation function LeakyReLU	54,438
Q_r Q_s	17,129	11 входов ИНС; 6 скрытых слоёв; функция активации LeakyReLU 11 inputs of ANN; 6 hidden layers; activation function LeakyReLU	51,245
Q_k Q_f	13,584	10 входов ИНС; 7 скрытых слоёв; функция активации LeakyReLU 10 inputs of ANN; 7 hidden layers; activation function LeakyReLU	49,188
Q_n Q_w	29,513	10 входов ИНС; 7 скрытых слоёв; функция активации LeakyReLU 10 inputs of ANN; 7 hidden layers; activation function LeakyReLU	55,980

Заключение

При планировании показателей производства нефтегазодобывающего предприятия важным является прогноз значений дебитов каждой добывающей скважины. Для повышения точности такого прогноза было предложено использовать глубокие искусственные нейронные сети.

Разработана методика подготовки реальных данных по дебитам скважин для обучения и тестирования глубоких искусственных нейронных сетей прямо-

го распространения. Проведены исследования различных архитектур таких искусственных нейронных сетей при решении задач прогноза дебитов нефти, газа, жидкости (газового конденсата) и дебита воды. В результате этих исследований выявлены наиболее эффективные архитектуры искусственных нейронных сетей, позволяющие увеличить точность прогноза в два и более раза по сравнению с точностью прогноза, даваемой традиционным методом экстраполяции по скользящей средней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анкудинов А.А., Полякова Н.С., Радевич Ю.Е. LUKOIL: Мониторинг разработки месторождения с использованием статистических методов анализа на примере перфорационных работ // ROGTEC Field Development, 2019. URL: <https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2019/12/LUKOIL-How-Data-Mining-Enhances-Oilfield-Development.pdf> (дата обращения 26.06.2020).
2. Марков Н.Г. Информационно-управляющие системы для газодобывающего производства. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 261 с.
3. Improvement of technological-mathematical model for the medium-term prediction of the work of a gas condensate field / M. Kutia, M. Fyk, O. Kravchenko, S. Palis, I. Fyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 83. – P. 40–48.
4. Косков В.Н. Геофизические исследования скважин. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2004. – 122 с.
5. Евсюткин И.В., Марков Н.Г. Управление геологическими мероприятиями на месторождениях нефти и газа с использованием искусственных нейронных сетей // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 62–69.
6. Al-Fattah S.M., Startzman R. Predicting natural gas production using artificial neural network // 2001 SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, SPE 68593. Dallas, TX, USA. URL: https://www.researchgate.net/publication/261697475_Predicting_Natural_Gas_Production_Using_Artificial_Neural_Network (дата обращения 26.06.2020).
7. Новый подход к доуточнению прогнозов прокси-моделей пласта с помощью алгоритмов машинного обучения / О.В. Зоткин, М.В. Симонов, А.Е. Осокина, А.М. Андрианова, А.С. Маргарит, В.А. Тимошенко, С.Ф. Лебедев // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 60–63.
8. Khandakar M.R., Louis J. Times-series data augmentation and deep learning for construction equipment activity recognition // Advanced Engineering Informatics. – 2019. – V. 42. – P. 1–12.
9. Раджабов С.Р., Базаров Г.Р. Технологический режим эксплуатации скважин месторождения Зеварды // Молодой ученый. – 2015. – Т. 88. – № 8. – С. 292–294. URL: <https://moluch.ru/archive/88/16556/> (дата обращения: 26.06.2020).
10. Generating moving average trading rules on the oil futures market with genetic algorithms / L. Wang, H. An, X. Xia, X. Liu, X. Sun, X. Huang // Mathematical Modelling and Algorithms in Finance. – 2014. – V. 2014. – 10 p. [Article ID 101808].
11. Вальес-Лосано Дж., Репин-Поляков Н.Н. Применение метода кривой падения Арпса для прогноза дебита скважины // Наука, техника и образование. – 2020. – Т. 69. – № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-metoda-krivoy-padeniya-arpsa-dlya-prognoza-debita-skvazhiny> (дата обращения: 26.06.2020).
12. Kofi Sarpong Adu-Manu, John Kingsley Arthur. A review of data cleansing concepts achievable goals and limitations // International Journal of Computer Applications. – 2013. – V. 7. – № 76. – P. 19–22.
13. A survey of forecast error measures / M. Shcherbakov, N.L. Shcherbakova, A. Brebels, A. Tyukov // World Applied Sciences Journal. – 2013. – V. 24. – P. 171–176.
14. Bourke P. Interpolation methods. 1999. URL: <http://paulbourke.net/miscellaneous/interpolation/> (дата обращения: 26.06.2020).
15. Berrar D. Cross-Validation // Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology. – 2018. – V. 1. – P. 542–545.
16. The Microsoft Cognitive Toolkit. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/cognitive-toolkit/> (дата обращения 26.06.2020).
17. Benchmarking state-of-the-art deep learning software tools / Shaohuai Shi, Qiang Wang, Pengfei Xu, Xiaowen Chu // arXiv:1608.07249v7 [cs. DC] 17 Feb 2017. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1608.07249.pdf> (дата обращения: 26.06.2020).
18. Григоренко Е. «Почему CNTK?». URL: <https://habr.com/ru/company/microsoft/blog/336552/> (дата обращения: 26.06.2020).
19. «7 Types of Neural Network Activation Functions: How to Choose?». URL: <https://missinglink.ai/guides/neural-network-concepts/7-types-neural-network-activation-functions-right/> (дата обращения: 26.06.2020).
20. Baptista D., Rodrigues S., Morgado-Dias F. Performance comparison of ANN training algorithms for classification // Conference: Intelligent Signal Processing (WISP). IEEE 8th International Symposium. – Funchal, Portugal, 2013. – P. 115–120.

Поступила 03.11.2020 г.

Информация об авторах

Евсюткин И.В., ассистент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Марков Н.Г., доктор технических наук, профессор отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.276:004.896

DEEP ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR FORECASTING DEBIT VALUES FOR PRODUCTION WELLS

Ivan V. Evsyutkin¹,
ive1@tpu.ru

Nikolay G. Markov¹,
markovng@tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the need for supporting the decision-making by specialists of the extracting enterprises of the oil and gas industry at production management. Precise forecasting of production wells debits values allows defining such technological operating modes of a well stock and processing equipment which would allow reaching the prescribed production volume. The existing methods do not always provide the demanded precision level at the forecast of wells debits values that leads to mistakes at the calculation of economic effect at a profitability assessment of production wells and the subsequent deliveries of hydrocarbonic raw materials, and also at taking into account the restrictions imposed by environmental supervision of natural resources use.

The main aim of the research is to develop and offer the most effective models of deep artificial neural networks at the forecast of production components values for hydrocarbonic raw materials – oil, gas, fluid (gas condensate), and water.

Objects of the research are technological parameters of production wells debits of well-stock of oil, gas, oil and gas, and oil-gas condensate fields.

Methods: the methods of the analysis of a large amount of technical data of wells developed according to the concept of «Big Data»; models of deep artificial neural networks; object-oriented programming; methods of an assessment and the statistical analysis of research results of deep artificial neural networks efficiency at the forecast of production wells debit values.

Results. The technique of data preparation for wells debits is developed for training and testing of feed-forward deep artificial neural networks. Research is carried out for various architectures for such artificial neural networks at the solution of the forecasting task of oil, gas, fluid (gas condensate), and water debits. The most effective architecture of feed-forward deep artificial neural networks is developed. Such neural networks allow increasing the forecasting accuracy in two and more times in comparison with the accuracy of the forecasting received by a traditional method of extrapolation (moving average).

Key words:

Oil and gas field, production well, forecasting of wells debits values, models of deep artificial neural networks, research of efficiency of feed-forward deep neural networks.

REFERENCES

- Ankudinov A.A., Polyakova N.S., Radevich Y.E. LUKOIL: How Data Mining Enhances Oilfield Development. *ROGTEC Field Development*, 2019. Available at: <https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2019/12/LUKOIL-How-Data-Mining-Enhances-Oilfield-Development.pdf> (assessed 26 June 2020).
- Markov N.G. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy dlya gazodobyvayushchego proizvodstva* [Management information systems for gas production]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2016. 261 p.
- Kutia M., Fyk M., Kravchenko O., Palis S., Fyk I. Improvement of technological-mathematical model for the medium-term prediction of the work of a gas condensate field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 83, pp. 40–48.
- Koskov V.N. *Geofizicheskie issledovaniya skvazhin* [Geophysical surveys of wells]. Perm, Perm State Technical University Publ., 2004. 122 p.
- Evsyutkin I.V., Markov N.G. Upravlenie geologo-tekhnicheskimi meropriyatiyami na mestorozhdeniyakh nefi i gaza s ispolzovaniem iskusstvennykh neyronnykh setey [Management of geological and technical arrangements at oil and gas fields with the use of artificial neural networks]. *Doklady TUSUR*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 62–69.
- Al-Fattah S.M., Startzman R. Predicting natural gas production using artificial neural network. *2001 SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium*, SPE 68593. Dallas, TX, USA. Available at: https://www.researchgate.net/publication/261697475_Predicting_Natural_Gas_Production_Using_Artificial_Neural_Network (assessed 26 June 2020).
- Zotkin O.V., Simonov M.V., Osokina A.E., Andrianova A.M., Margarit A.S., Timoshenko V.A., Lebedev S.F. Novy podkhod k doutochneniyu prognozov proksi-modeley plasta s pomoshchyu algoritmov mashinnogo obucheniya [New approach to the additional improvement of forecasts of layer proxy models using machine learning algorithms]. *Neftyanoe hozaystvo*, 2019, no. 12, pp. 60–63.
- Khandakar M.R., Louis J. Times-series data augmentation and deep learning for construction equipment activity recognition. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, vol. 42, pp. 1–12.
- Radzhabov S.R., Bazarov G.R. Tekhnologicheskii rezhim ekspluatatsii skvazhin mestorozhdeniya Zevardy [Technological mode of the wells' operation of Zevarda field]. *Molodoy Ucheniy*, 2015, vol. 88, no. 8, pp. 292–294. Available at: <https://moluch.ru/archive/88/16556/> (assessed 26 June 2020).
- Wang L., An H., Xia X., Liu X., Sun X., Huang X. Generating moving average trading rules on the oil futures market with genetic algorithms. *Mathematical Modelling and Algorithms in Finance*, 2014, vol. 2014, 10 p. [Article ID 101808].
- Valyes-Losano J., Repin-Polyakov N.N. Primenenie metoda krivoy padeniya Arpsa dlya prognoza debita skvazhiny [Application of the Arps decline curve method for the forecasting of well debit]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2020, vol. 69, no. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metoda-krivoy-padeniya-arpsa-dlya-prognoza-debita-skvazhiny> (assessed 26 June 2020).
- Kofi Sarpong Adu-Manu, John Kingsley Arthur. A review of data cleansing concepts achievable goals and limitations. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 7, no. 76, pp. 19–22.
- Shcherbakov M., Shcherbakova N.L., Brebels A., Tyukov A. A survey of forecast error measures. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 24, pp. 171–176.
- Bourke P. *Interpolation methods*. 1999. Available at: <http://paulbourke.net/miscellaneous/interpolation/> (assessed 26 June 2020).

15. Berrar D. Cross-Validation. *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology*, 2018, vol. 1, pp. 542–545.
16. *The Microsoft Cognitive Toolkit*. Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/cognitive-toolkit/> (assessed 26 June 2020).
17. Shaohuai Shi, Qiang Wang, Pengfei Xu, Xiaowen Chu. *Benchmarking state-of-the-art deep learning software tools*. arXiv:1608.07249v7 [cs. DC] 17 Feb 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1608.07249.pdf> (assessed 26 June 2020).
18. Grigorenko E. «*Pochemu CNTK?*» [«Why CNTK?»]. Available at: <https://habr.com/ru/company/microsoft/blog/336552/> (assessed 26 June 2020).
19. «7 Types of Neural Network Activation Functions: How to Choose?». Available at: <https://missinglink.ai/guides/neural-network-concepts/7-types-neural-network-activation-functions-right/> (assessed 26 June 2020).
20. Baptista D., Rodrigues S., Morgado-Dias F. Performance comparison of ANN training algorithms for classification. *Conference: Intelligent Signal Processing (WISP). IEEE 8th International Symposium*. Funchal, Portugal, 2013. pp. 115–120.

Received: 3 November 2020.

Information about the authors

Ivan V. Evsyutkin, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay G. Markov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.4.042+551.4.022+559.462

СОВРЕМЕННЫЙ ЗОЛОВЫЙ МОРФОЛИТОГЕНЕЗ: ИЗУЧЕННОСТЬ, РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

Евсеева Нина Степановна¹,
nsevseeva@yandex.ru

Язиков Егор Григорьевич²,
yazikoveg@tpu.ru

Квасникова Зоя Николаевна¹,
zoi kwas@rambler.ru

Батманова Антонина Сергеевна¹,
tonu6ka@yandex.ru

Бучельников Виктор Сергеевич²,
victor.buchelnikov@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

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

Актуальность исследования экзогенных процессов, в том числе дефляции, обусловлена как положительным, так и отрицательным воздействием их на природные компоненты и хозяйственную деятельность человека. Кроме того, не до конца выявлены особенности региональной миграции вещества при развитии этих процессов и интенсивность аккумуляции золового наноса, его вещественный состав. Изучение факторов развития эрозии и дефляции в геосистемах юго-востока Томской области показало, что природные и социально-экономические факторы региона благоприятны для развития золовых процессов.

Цель: оценка интенсивности аккумуляции золового осадка и его вещественного состава в ландшафтах юго-востока Томской области.

Объекты: природные и антропогенные комплексы Томь-Яйского междуречья в пределах бассейна р. Басандайки – правого притока р. Томи.

Методы: полевые (маршрутные) наблюдения с отбором проб, лабораторные и аналитические исследования.

Результаты многолетних наблюдений показали, что в холодный период года золовые процессы в агроландшафтах юго-востока лесной зоны Западно-Сибирской равнины проявляются ежегодно, но с разной степенью интенсивности. Наиболее активно они развиваются в малоснежные годы. В гранулометрическом составе золового наноса преобладает пыль, в минералогическом – кварц и мусковит. Золовые отложения содержат значительное количество элементов питания растений – гумуса – до 10 %. Не исключая притока атмосферных выпадений из других регионов, считаем, что основная масса золового осадка ключевых участков (юго-восток Томской области) в холодное время года имеет местное происхождение, об этом свидетельствует большое сходство его гранулометрического, химического и минералогического состава с почвами региона.

Ключевые слова:

Дефляция, золовые процессы, Томская область, Томь-Яйское междуречье, пылеуловитель, пашня.

Введение

В настоящее время особую актуальность в исследованиях наук о Земле приобретают пространственно-временные сравнения – стационарные, полустационарные наблюдения и их увязка с динамикой географической оболочки; они являются логическим продолжением локального и регионального направлений исследования природы и выступают элементами единой системы мониторинга окружающей среды.

Одно из таких направлений – изучение экзогенных процессов рельефообразования. Определение скоростей их развития, интенсивности седиментации современных осадков (озерных, аллювиальных, морских, золовых и др.) рано или поздно приводят исследователя к мысли о потоках вещества в географической оболочке. Концепция потоков создана трудами многих ученых – В.И. Вернадского, Б.Б. Польнова, В.А. Ковды, М.А. Глазовской, Г.В. Добровольского,

А.И. Перельмана, Н.Ф. Глазовского, Н.С. Касимова, В.П. Чичагова и др. Одними из активных экзогенных процессов, создающих потоки вещества, являются золовые, основы изучения которых заложены Н.М. Пржевальским, В.А. Обручевым, П.А. Гутковским, Д.В. Наливкиным и другими исследователями.

В современную эпоху золовые процессы распространены почти во всех природных зонах, но наиболее интенсивно они развиваются в степях, полупустынях и пустынях. В аридной и семиаридной зонах эти процессы создают золовые потоки песка, пыли, аэрозолей и солей в приземном слое атмосферы. По сравнению с водными потоками золовые потоки имеют большой фронт распространения в ширину, длину и высоту, что связано с огромными масштабами площади их контакта с суши, акваторией и атмосферой. Развитие золовых процессов и создаваемые ими потоки оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на окружающую среду.

рицательное влияние на природные компоненты и деятельность человека. Например, почвы гор Сьерра-Невада (Калифорния, США) бедны фосфором, но благодаря тому, что золовые потоки приносят из пустыни Гоби в том числе и этот элемент на склоны гор, здесь произрастают густые леса, среди которых и знаменитые секвойи [1]. Но золовые потоки вместе с пылью переносят и патогенные микроорганизмы, вызывающие болезни, различные токсичные химические элементы, среди которых и радиоактивные [2]. Экономический ущерб от золовых процессов очень велик, он обусловлен различными факторами, среди которых наиболее значимые: снижение почвенного плодородия; выдувание и засыпание сельскохозяйственных культур, ирригационных каналов, дорог; нарушение работы линий электропередач, трубопроводов и др. Основная часть финансовых убытков от золовых процессов приходится на долю дефляции. Приблизительно величину ущерба от золовой деятельности можно оценить в 5–7 млрд долл./год [3].

Вследствие вышесказанного, изучению золовых процессов уделяется большое внимание как в нашей стране, так и за рубежом [4–9]. Исследования золовых процессов многоаспектны и посвящены факторам их развития, интенсивности и аккумуляции выпадающих из атмосферы осадков, их гранулометрического и химического составов, пылевой минерало-

гии, влиянию на компоненты ландшафта; моделируются процессы ветровой эрозии. Также проводятся работы по выявлению очагов возникновения и географического распространения золовых морфодинамических процессов в аридном и семиаридных поясах Евразии, связанных с пространственным положением полярного фронта, разделяющего умеренный (полярный) и тропический воздух. Рассматривается влияние динамики атмосферы (скорость и повторяемость ветров различных направлений) на интенсивность и пространственную упорядоченность золовых процессов [10–12].

На равнинах умеренного пояса Евразии выделены три экзогенно-динамические зоны современной дефляции и потоки золовой миграции вещества (рис. 1). В азиатском регионе зона выдувания более динамична и растянута в пространстве, поскольку возникновение этого явления связано с фронтальными процессами [12]. Выдувание и транзит пыли происходит в основном с подстилающей поверхности засушливых и сухих степей Ишим-Иртышского и Обь-Иртышского междуречий, а выпадение пыли приходится на лесные районы юго-восточной и центральной частей Западной Сибири. Установлено, что современные распаханые степи наряду с аридными ландшафтами умеренного и тропического поясов – также активная зона развевания вещества.

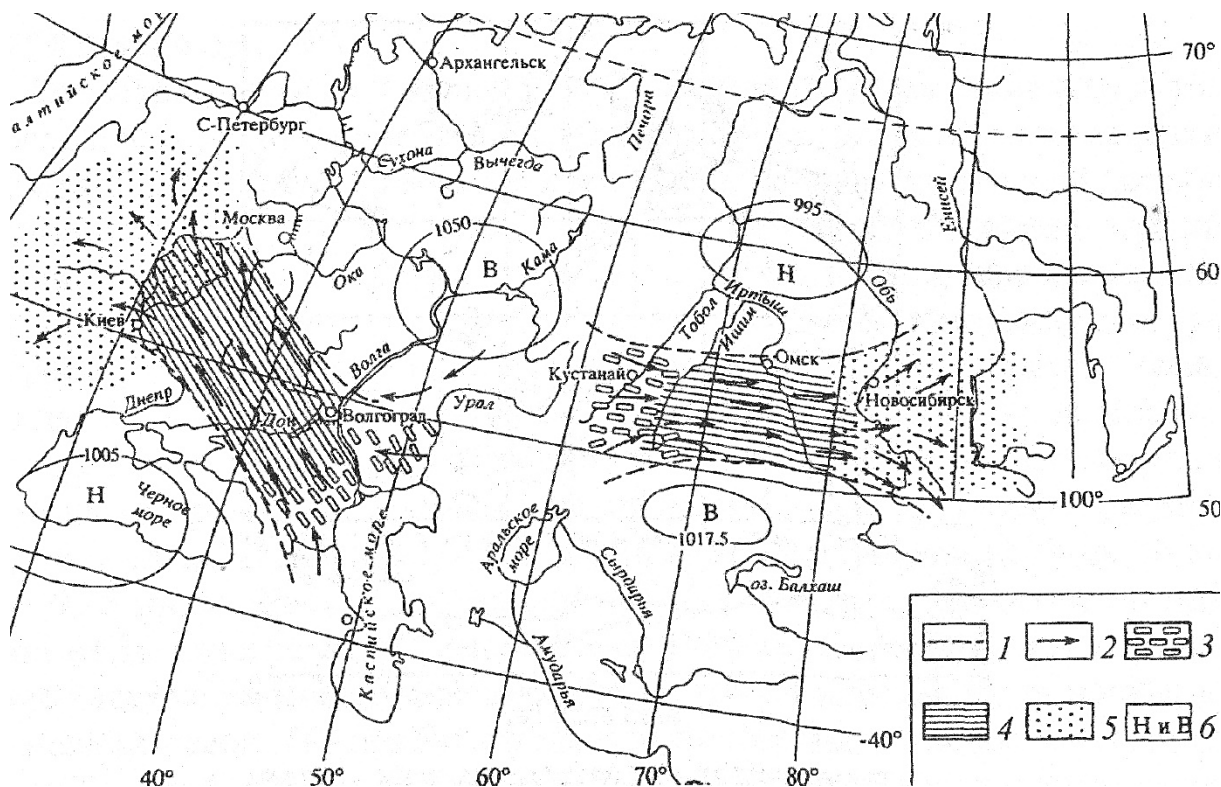


Рис. 1. Экзодинамические зоны современной дефляции и потоки золовой миграции вещества на равнинах умеренного пояса Евразии [12]: 1 – границы областей активной дефляции, 2 – направление воздушного потока при сильных пыльных бурях; зоны: 3 – преобладающего выдувания, 4 – переноса, локального выдувания и аккумуляции, 5 – накопления золового материала; 6 – области низкого и высокого давления

Fig. 1. Exodynamic zones of modern deflation and aeolian migration fluxes of material on Eurasian temperate zone lowlands [12]: 1 – active deflation zone edges; 2 – the direction of moving air under the strong dust-storm conditions; zones: 3 – predominant deflation; 4 – migration, local deflation, and accumulation; 5 – aeolian material accumulation; 6 – low and high-pressure zones

Изучение глобальных потоков и миграции минерального вещества на уровне межгеосферного обмена позволило оценить массу ежегодного выноса пыли. Согласно этим оценкам в период доантропогенного воздействия на литосферу ежегодный вынос пыли в атмосферу не превышал 0,05 т/га. По разным оценкам общемировое продуцирование пыли достигает 0,34 т/га [12]. Таким образом, с доантропогенного периода продуцирование пыли увеличилось почти в 7 раз: от 50 до 340 кг/га в год.

Осаждение пыли на земную поверхность оказывает влияние на вещественный состав рыхлых отложений. В связи с чем большой интерес представляет вопрос о роли этих осадков в формировании лессовых пород, поскольку в зонах выдувания происходит дефляция почвенного покрова, а в зонах аккумуляции – накопление золового наноса. Исследования В.Т. Трофимова и др. показали влияние золовых процессов на формирование лессовых пород во время плейстоценовых оледенений и в современную эпоху. В результате анализа разнообразия климатов и ландшафтов Азии и распространения лессовых пород намечены две субширотные зоны: субтропическая пустынно-лессовая и умеренная перигляциально-лессовая [13]. Последняя приурочена к умеренным широтам – примерно от 45° с.ш. до 60° с.ш., в ее пределах могут быть выделены провинции – Западно-Сибирская, Алтае-Саянская, юго-востока Сибири и Забайкалья.

В целом в изучении золовых процессов достигнуты успехи, но есть и нерешенные вопросы, имеющие как теоретическое, так и практическое значение. Согласно А.Н. Сажину и др. актуальными являются две проблемы: скорость золовой планации и пространственная межгеосферная миграция вещества или направление перемещения минеральной взвеси при сильных пыльных бурях и ураганах, выпадение ее из

двухфазового потока и аккумуляция на подстилающей поверхности [11]. М.Е. Бельгибаев отмечает, что еще не до конца известны биогеохимические процессы в атмосфере, морях, океанах и качественные изменения выпадающих из атмосферы осадков [14]. J.S. Munroe указывает на то, что в большинстве наблюдений, где было проведено изучение современного осаднения пыли, не были исследованы геохимия и минералогия пыли, что приводит к неопределенности в отношении ее источников [9]. Кроме того, не до конца изучено влияние золового наноса на воды, почвы, растительность, а также особенности региональной миграции вещества при развитии этих процессов и интенсивность аккумуляции золового наноса, его вещественный состав. Недостаточно исследованы названные проблемы и для лесной зоны юго-востока Западно-Сибирской равнины.

Изучение экзогенных процессов рельефообразования, в том числе факторов развития эрозии и дефляции в геосистемах юго-востока Томской области показало, что природные и социально-экономические факторы региона благоприятны для развития золовых процессов.

Цель данной работы – оценка интенсивности аккумуляции золового осадка и его вещественного состава в природных и антропогенных комплексах юго-востока Томской области.

Объект исследования

Объектом исследования являются геосистемы Томь-Яйского междуречья в пределах бассейна реки Басандайка – правого притока р. Томи (рис. 2). Антропогенная трансформация ландшафтов региона способствует развитию золовых процессов (дефляции, переноса и аккумуляции) в пределах агроландшафтов, на вырубках, гарях и других участках с активной хозяйственной деятельностью.

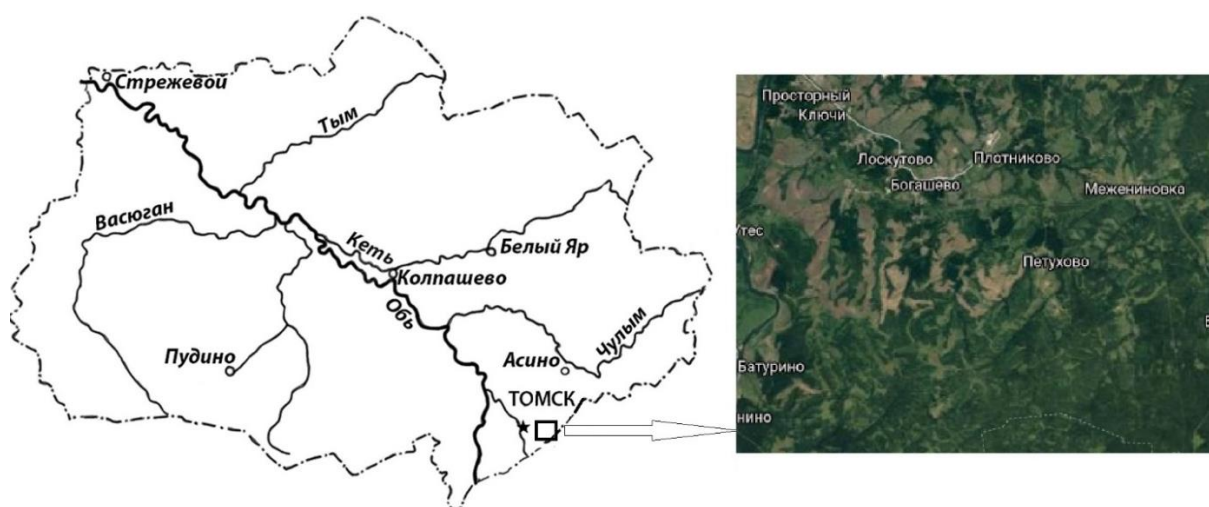


Рис. 2. Район исследования в пределах юго-востока Томской области (выделен в прямоугольник)

Fig. 2. Study area within the southeast of Tomsk region (highlighted by the rectangle)

Таблица 1. Средняя и максимальная скорости ветра с учетом порывов по станции Томск [15], м/с

Table 1. Average and maximum wind speed with account for gusts at the Tomsk weather station [15], m/s

Месяц/Month	Средняя за 5 лет Average for 5 years	Абсолютный максимум Absolute maximum	Месяц/Month	Средняя за 5 лет Average for 5 years	Абсолютный максимум Absolute maximum
январь/January	7,2	17	июль/July	7,1	17
февраль/February	7,6	24	август/August	7,2	13
март/March	7,1	14	сентябрь/September	7,3	17
апрель/April	8,9	19	октябрь/October	7,4	18
май/May	9,1	18	ноябрь/November	7,9	22
июнь/June	8,2	14	декабрь/December	8,7	20

Изучаемый район входит в умеренную перигляциально-лессовую зону распространения лессовых пород (45° – 60° с.ш.) [13]. Мощность лессовых пород в пределах междуречья изменяется от 0,8 до 13 м. Бассейн р. Басандайки относится к району развития сильного ветра, где его скорость во все месяцы года достигает 20–34 м/с. Ветер вблизи земной поверхности характеризуется турбулентностью (порывистостью), т. е. его скорость меняется во времени и пространстве. Во время порывов средняя и максимальные скорости ветра за 10 минут изменяются в течение года от 7,1 до 24 м/с (табл. 1). Частота порывов значительна, например, при средней скорости ветра 4 м/с в среднем наблюдается 5 порывов в минуту, а при 13 м/с – 85 порывов [15]. Сильные и порывистые ветры производят дефляцию почв, особенно на наветренных и возвышенных участках пашни, вырубках и других территориях подверженных антропогенной деятельности.

Хозяйственное освоение земель исследуемой территории ведется с начала XVII в. Распашке подвергаются в основном серые лесные почвы и их подтипы, а также дерново-подзолистые, черноземы оподзоленные и выщелочные [16]. Почвы региона содержат большое количество пыли, что является одним из признаков их дефляционной опасности (до 80 %). Более подробно факторы развития ветровой эрозии изложены нами в работе [17].

Фактический материал, методы и приемы исследования

Бассейн реки Басандайка площадью более 400 км^2 – один из наиболее освоенных в сельскохозяйственном отношении, расположен в центральной части Томь-Яйского междуречья и принят нами за фоновый исследуемый район. В его пределах выделены ключевые участки где проводятся полустационарные наблюдения за золовыми процессами в течении 32 лет (с 1989 г.). Реализация цели исследования осуществлена на основе проведения следующих видов работ:

- 1) отбор проб из шурфов в снежной толще во время выполнения ежегодных маршрутных снегосъемок в микромасштабе (130 проб), что позволило определить интенсивность аккумуляции золового наноса в снежной толще за период от образования устойчивого снежного покрова (в основном II–III декады октября) до времени его максимального накопления (I–II, реже III декады марта – начало апреля);
- 2) наблюдения за седиментацией золового наноса во время снеготаяния, когда отбирались пробы с поверхности снега за разные отрезки времени после снегопа-

- да с площадок в 1 м^2 и толщиной снега в 1–2 см по профилям длиной от 200–500 до 1200 м (113 проб);
- 3) наблюдения за аккумуляцией золового наноса в пылеуловителях (с 2013 г.) по методу М. Reheis [6]. Пылеуловители размещались в разных элементарных природных и антропогенных комплексах – на наветренных склонах пашни, в березовой и сосновой лесополосах, на кромке и в глубине кедрового леса (37 проб);
- 4) наблюдения за скоростью ветра на высоте 1 м над поверхностью земли на пашне анемометром АРИ-49. Порывы ветра достигали в зимний и весенний периоды до 20–25 м/с;
- 5) определение химического состава (микроэлементов) (108 проб), макроэлементов-биогенов (С, N, Р, гумуса) (35 проб) и гранулометрического состава (17 проб), золового наноса, минералогического состава почв (6 проб) и атмосферных выпадений из пылеуловителей (2 пробы). Геохимический состав определялся с помощью аттестованной методики количественного атомного эмиссионного анализа (свидетельство № 08-47/200) в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем», Томского государственного университета. Вещественный состав изучался методами оптической микроскопии, с помощью бинокулярного микроскопа Leica EZ4D, а также рентгенофазового анализа (РФА), на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser, на базе учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики МИНОЦ «Урановая геология» Томского политехнического университета;
- 6) определение показателя дефляционной опасности почв (ПДО) по методике М.Е. Бельгибаева [14].

Результаты и их обсуждение

Согласно А.Н. Сажину и др. [10] лесная зона юго-востока Западно-Сибирской равнины – это область накопления золового материала, выпадающего из потоков в атмосфере (рис. 1). Наши 32-летние наблюдения показывают, что на пашне дефляция, перенос и аккумуляция почвенных частиц происходят круглый год, но с разной степенью интенсивности.

Авторами данной работы определен показатель дефляционной опасности почв (ПДО) региона для верхних горизонтов почв (0–10; 0–20 см), он рассчитывается по отношению процентного содержания физической глины ($<0,01 \text{ мм}$) и физического песка ($>0,01 \text{ мм}$). Значения ПДО распределяются следующим образом: 0–0,3 – очень сильноподатливые;

0,3–0,6 – сильноподатливые; 0,6–1,2 – среднеподатливые; 1,2–2,0 и более – слабоподатливые. Расчеты ПДО, проведенные по 49 пробам почв в бассейне р. Басандайки, отобранном в основном на пашне, показали, что 6,2 % из них относятся к очень сильноподатливым; 26,5 % – сильноподатливые, 57,1 % – к среднеподатливым, и только 10,2 % – к слабоподатливым [18]. Анализ полученных расчетов показывает, что около 33 % почв пашни региона сильноподатливы к ветровой эрозии, а более 57 % – среднеподатливые.

Исследованиями ряда ученых [19, 20] установлено, что движение выдутых ветром частиц почвы волнообразное и осуществляется путем перекачивания, скачками и во взвешенном состоянии. Основная масса мелкозема (до 95 %) переносится ветром в приземном слое почвоветрового потока, толщина этого слоя по разным оценкам может достигать 40–50 см. По данным наших наблюдений во время порывов ветра со скоростью около 20 м/с по поверхности снега скачками высотой до 40–50 см переносятся комочки почвы диаметром до 3 мм (возможно и более). Для поддержания пылеватых частиц во взвешенном состоянии достаточно скоростей ветра 2–3 м/с. При скоростях ветра более 15–16 м/с массовый перенос песка (песчаные бури), грунта, снега (но не пыли) может происходить в слое до 2 м от поверхности [19].

Авторами данной статьи выполнен значительный объем работ по определению интенсивности аккумуляции продуктов ветровой эрозии и их вещественного состава, выпадающих из почвоветрового потока при перекачивании и сальтации, а также взвешенных частиц на высоте 2 м над поверхностью земли. Наиболее полно интенсивность седиментации эолового наноса, ее динамика и вещественный состав изучены нами на примере ветровой эрозии холодного периода года (октябрь–апрель) с выделением стадий: 1 – в период устойчивого залегания снежного покрова; 2 – во время снеготаяния. Рассмотрим полученные результаты по названным стадиям:

1. Зимняя ветровая эрозия наиболее активно развивается в малоснежные годы, когда на этот процесс сильно влияет мезо- и микрорельеф пашни на разных участках склонов. Наши наблюдения хорошо согласуются с исследованиями К.С. Кальянова: влияние рельефа выражается в изменении скорости ветра на разных участках склона [21]. На наветренных склонах и возвышенных участках пашни происходит увеличение скорости ветра, что приводит к образованию на них очагов дефляции. Наблюдаемые размеры таких

очагов изменялись от долей квадратного метра до 3–4 га. Темная поверхность пашни подвергается морозному выветриванию, верхний слой почвы иссушается, становится рыхлым до глубины 5 см и более, сильные ветры разрушают почвенный покров, и в снежной толще появляются грязные прослойки. Наблюдаемое количество их достигает от 1 до 5–7 штук.

Интенсивность накопления эоловых осадков неравномерна, что объясняется возникновением на поверхности снега эоловой ряби, когда массовое движение частиц почвы во время эрозии при сравнительно небольших скоростях ветра происходит в форме волн, а вынос почвы сводится к перемещению этих волн. Этот факт подтверждается отборами проб по опорным профилям за 1989–2020 гг. Наиболее дефляционноопасной была малоснежная зима 2011–2012 гг., когда в снежной толще в понижениях рельефа накопилось до 1848 г/м² эолового осадка.

Многолетние наблюдения за седиментацией эолового осадка за период устойчивого залегания снежного покрова показали, что она неравномерна не только в пространстве, но и во времени и изменялась в среднем от менее 1 г/м² (зима 2012–2013 гг.) до 724 г/м² (зима 2011–2012 гг.) (по данным 96 проб). Полученные данные о массе эолового наноса в снежной толще позволили рассчитать среднесуточную величину аккумуляции (табл. 2)

Анализ таблицы показывает, что среднесуточная величина аккумуляции наноса в снежной толще варьировала от 0,029 до 6,17 г/м², а зимой 2011–2012 гг. местами достигала 15,03 г/м². Это сопоставимо с аккумуляцией пыли после пыльных бурь в аридных ландшафтах: так, в Туркмении после 10-минутной пыльной бури на площади около 8400 км² выпало около 100 кг/га пыли [21] или около 10 г/м².

Наши 32-летние наблюдения показали, что можно выделить зимы слабого проявления ветровой эрозии, когда в снежной толще пашни накапливалось менее 50 г/м² наноса (43,3 % случаев); умеренного – 50–100 г/м² (10 %); среднего – 100–200 г/м² (10 %); сильного – 200–500 г/м² (26,7 %) и очень сильного – 500–1000 г/м² (10 % случаев). В кедровом лесу в снежной толще за указанный период времени содержание эолового осадка изменялось от 0,02 г/м² (зима 2005–2006 гг.) до 18,8 г/м² (зима 2007–2008), а среднесуточная аккумуляция – доли грамма. В гранулометрическом составе эолового осадка в снежной толще агроландшафта преобладает пыль (табл. 3).

Таблица 2. Среднесуточная аккумуляция эолового материала в снежной толще (на примере ряда лет)

Table 2. Average daily aeolian material accumulation within the snow cover (the case of series of years)

Годы, зима Years, winter	Даты залегания устойчивого снежного покрова и снегосъемки Dates of stable snow covering and snow survey	Количество суток Number of days	Среднее значение массы осадка в снеге, г/м ² Average deposit mass value within the snow, g/m ²	Среднее значение интенсивности аккумуляции за сутки, г/м ² Average accumulation intensity value per day, g/m ²
1989–1990	31.10.1989–25.03.1990	144	301,0	2,1
1992–1993	27.10.1992–24.03.1993	147	4,24	0,03
2002–2003	15.10.2002–15.03.2003	150	550,0	3,7
2004–2005	16.10.2004–11.03.2005	145	80,1	0,6
2011–2012	29.10.2011–02.03.2012	123	752,4	6,1
2014–2015	16.10.2014–14.03.2015	148	143,5	0,9
2016–2017	15.10.2016–15.03.2017	150	22,0	0,15
2018–2019	26.10.2018–16.03.2019	130	23,2	0,18

Таблица 3. Гранулометрический состав отложений и содержание в них биогенов

Table 3. Grain size distribution of deposits and content of organic matter

Тип отложений Type of deposit	Гумус Humus, %	C, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	N, %	P, %	pH, водный pH of aqueous solution	Гранулометрический состав Grain size					
								1,0...0,25	0,25...0,05	0,05...0,01	0,01...0,005	0,005...0,001	<0,001
Осадок из снежной толщи Snow mass sediment	1,0...4,1	0,9...2,1	До 17,9	4,7	0,1	До 0,2	6,4	0,9	17,1	40,9	6,5	13,7	20,8
Эоловый нанос с поверхности снега Aeolian deposit from the snow surface	1,7...4,5	1,0...2,2	До 17,8	8,9	0,3	0,4	5,6	1,9	19,5	38,9	9,9	11,2	18,6

Таблица 4. Вариации интенсивности аккумуляции эолового осадка на поверхности снега за разные отрезки времени на примере ряда лет

Table 4. Variations in the intensity of aeolian deposits accumulation on the snow surface over different time periods (the case of a number of years)

Период наблюдений Observation period	Масса осадка на поверхности снега, г/м ² Mass of deposit on the snow surface, g/m ²	Интенсивность аккумуляции, г/м ² сутки Accumulation intensity, g/m ² /day
1990: 25.03–08.04	18,2...102,4	1,3...7,31
1993: 16.03–24.03	0,13...7,84	0,02...0,98
2004: 08.03–21.03 20.03–21.03	54,48...209,9 до 23,6	4,54...17,49
2015: 14.03–11.04 11.04–25.04	0,04...36,51 3,9...320,0	0,001...1,30 0,28...22,86
2019: 18.04–27.04	1,22...10,64	0,13...1,18

2. Из табл. 4 видно, что в отдельные годы во время снеготаяния на пашне случаются местные «пыльные бури», когда за короткие отрезки времени на поверхность снега выпадало до 74,83 г/м² эолового осадка. Например, весной 2002 г. за 3 суток выпало на снег до 224,5 г/м² осадка; в 1991 г. за 15 суток – до 336,4 г/м², т. е. до 22,43 г/м² сутки.

В гранулометрическом составе на поверхности снега также преобладает пыль (табл. 3). Минералогический состав осадка с поверхности снега аналогичен лессовидным суглинкам, подстилающей породе исследуемого района, и представлен преимущественно кварцем и полевыми шпатами. В эоловых осадках в снежной толще и на эоловых волнах содержание гумуса в пробах на пашне изменялось от 1,1 до 4,5 %, Ca²⁺ – до 17,95; N – до 0,34 % и др. (табл. 3). Сравнение среднего содержания микроэлементов (тяжелых металлов) в эоловых отложениях показывает близость их химического состава с литогенным субстратом верхних горизонтов почв пашни плакорных местоположений [22].

Как отмечает Л.Б. Аристархова и др., при скоростях ветра более 15–16 м/с массовый перенос песка (песчаные бури), грунта, снега (но не пыли) может происходить в слое до 2 м над поверхностью земли [19]. Частицы диаметром менее 0,05 мм, оторванные от поверхности, под влиянием атмосферной диффузии могут находиться во взвешенном состоянии длительное время. При падении скорости ветра ниже 2 м/с пыль осажается на земной поверхности, закрепляясь на стеблях и листьях растений, шероховатой поверхности и др.

С целью определения вещественного состава и интенсивности накопления взвешенных частиц в воздушном потоке нами начаты наблюдения с использованием метода, предложенного М. Reheis [6] осенью 2013 г. Пылеуловители, расположенные на высоте 2 м над поверхностью земли, устанавливались в разных урочищах: лесополоса, кедровый лес, наветренные склоны пашни, и периодически очищались.

В данной статье анализируется содержание некоторых из определяемых тяжелых металлов в твердом осадке из пылеуловителей и снеговой воды, отобранных в 2017 г. Наблюдения за поступлением выпадений из атмосферы в пылеуловителях определялась в период с 22 мая по 31 августа, а снежной толще и на его поверхности с момента установления устойчивого снежного покрова до отбора проб 15 марта. Таким образом, были зафиксированы атмосферные выпадения в разные времена года.

Установлено, что пробы осадка пылеуловителей в лесополосах вблизи с. Лучаново и Плотниково характеризуются повышенными концентрациями свинца, меди и особенно цинка по сравнению с пробами твердого осадка снега в этих же участках (рис. 3). Возможно, что пылевое загрязнение атмосферного воздуха в летний период обусловлено трансграничным переносом загрязняющих веществ от источников выбросов предприятий, расположенных в соседних промышленных регионах (Новосибирская, Кемеровская области).

Наблюдения за накоплением эолового осадка позволили на данное время выявить неравномерное осаждение пыли в разных урочищах.

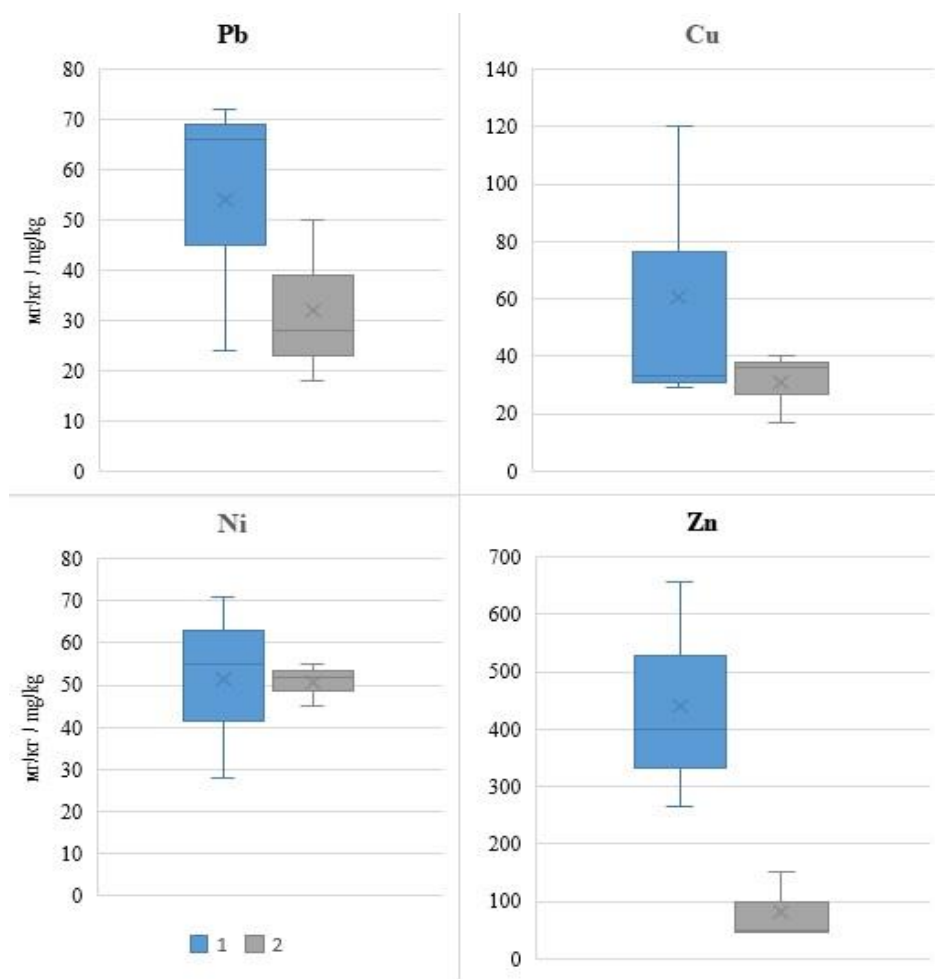


Рис. 3. Содержание химических элементов в осадке исследуемого района: 1 – пылеуловителей (июнь–август), 2 – снежной толщ и на поверхности снега (ноябрь–март) 2017 г.

Fig. 3. Content of chemical elements in deposits within the study area (2017): 1 – from dust traps (June–August), 2 – from snow mass and the surface of the snow surface (November–March)

Менее всего золотого материала накапливается в пылеуловителях на наветренных склонах пашни как за период устойчивого залегания снежного покрова, так и за отдельные отрезки времени (табл. 5).

Интенсивность осаждения золотого осадка на высоте 2 м над поверхностью земли как в холодное, так и в теплое время года за период наблюдений в пределах 1 г/м² сутки, редко более (май–август 2017 г.), что значительно меньше интенсивности аккумуляции в толще снега и на его поверхности. Примеры вещественного состава осадка из пылеуловителей, уста-

новленных в пределах ключевого участка в районе с. Лучаново, отражены на рис. 4.

В отложениях пылеуловителя, установленного на наветренном склоне пашни, хорошо различимы минеральные частицы округлой формы бледно-желтого цвета и бесформенные темного цвета (рис. 4, а). По сравнению с отложениями в пылеуловителе, установленном в кедровом лесу, здесь гораздо меньше частиц органического происхождения: остатков насекомых (крылышки, лапки и др.) и семян растений (рис. 4, б).

Таблица 5. Примеры накопления золотого осадка в пылеуловителях

Table 5. Examples of aeolian deposits accumulation in dust traps

Место отбора проб/Sampling place	Сроки наблюдения, годы Observation periods, years	Интенсивность аккумуляции, г/м ² /сутки Accumulation intensity, g/m ² /day
Наветренный склон пашни в районе с. Лучаново Windward slope of the arable land near the village Luchanovo	14.10.2014–14.03.2015	0,03
	21.03.2015–07.05.2015	0,06
Лесополоса из сосны в районе с. Лучаново Pine forest belt near the village Luchanovo	14.10.2014–14.03.2015	0,03
	21.03.2015–07.05.2015	0,08
	31.08.2017–30.10.2017	0,19
Лесополоса из березы в районе с. Плотниково Birch forest belt near the village Plotnikovo	22.05.2017–31.08.2017	1,66
Кедровый лес у с. Лучаново Cedar forest near the village Luchanovo	16.03.2019–14.09.2019	0,20

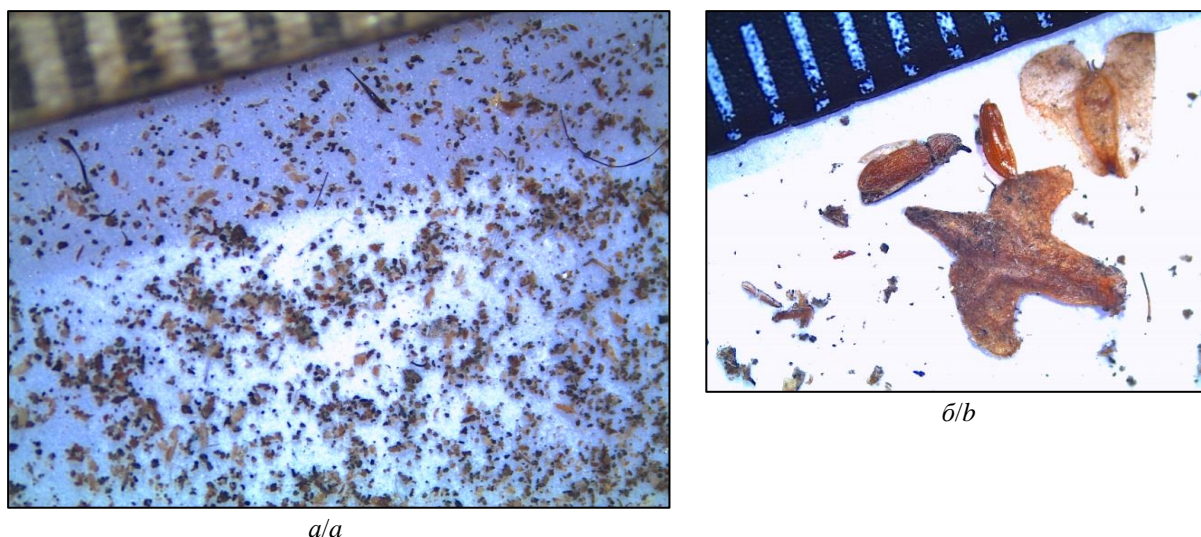


Рис. 4. Фотография образцов осадка из пылеуловителей исследуемого района: а) на пашне, 16-кратное увеличение; б) кедрового леса, 30-кратное увеличение (под оптическим микроскопом Leica EZ4D) (фото Е.Г. Язикова, 2019)

Fig. 4. Pictures of deposit samples from dust traps within the study area: a) on the arable land (x16); b) in the cedar forest (x30, optical microscope Leica EZ4D) (photo by E.G. Yazikov, 2019)

Исследование методом РФА показало, что основу минералогического состава отложений в пылеуловителе, снежной толще и верхних горизонтах почв исследуемого района составляют кварц и мусковит (рис. 5), содержание которых достигает 87,1 %. Полевые шпаты представлены в основном альбитом – от 4,6 до 32 %, тогда как калиевый полевой шпат

(ортоклаз) присутствует только в одном изучаемом образце – пылеуловителе, установленном на пашне, и составляет 10 %. Известковый шпат – кальцит, зафиксирован также в одном образце, в толще снега кедрового леса, и его содержание составляет 3,5 %. Глинистые минералы в исследуемых образцах не обнаружены.

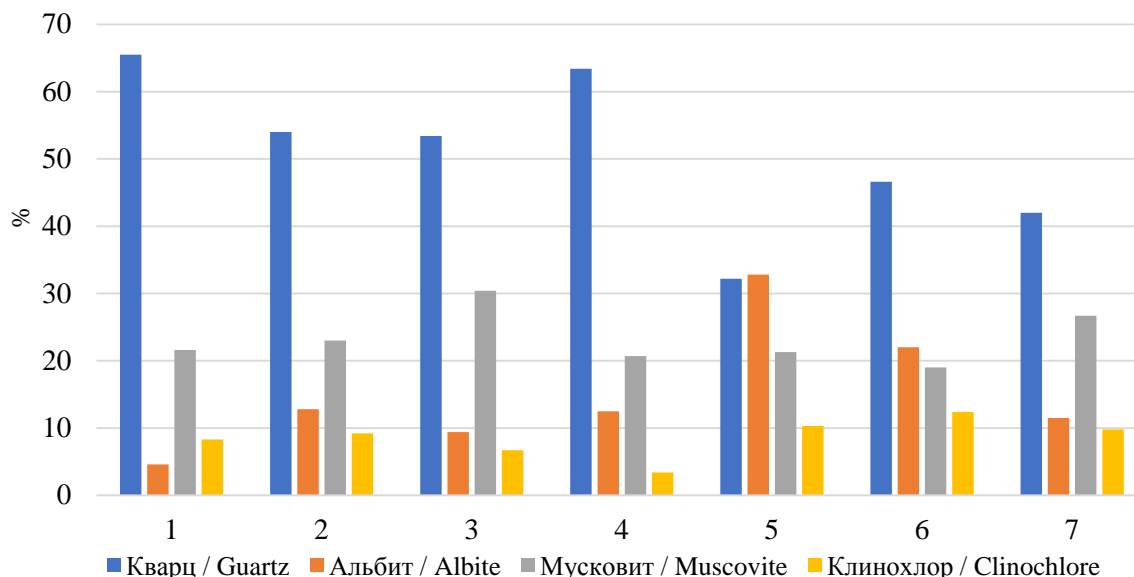


Рис. 5. Общий минералогический состав в исследуемых пробах ключевого участка: верхний горизонт почвы: 1 – пашня, 2 – кедровый лес под пылеуловителем, 3–4 – лесополоса; золовые отложения: 5 – в толще снега, 6 – в пылеуловителе кедрового леса, 7 – в пылеуловителе в лесополосе

Fig. 5. Mineral composition of the studied samples within the key area: topsoils of: 1 – arable land, 2 – cedar forest with a dust trap, 3–4 – forest belts; aeolian deposits of: 5 – snow mass, 6 – dust trap in the cedar forest, 7 – dust trap in a forest belt

Нами зафиксировано, что с высотой в почвоветровом потоке содержание пылеватых и илистых частиц возрастает и увеличивается содержание гумуса и дру-

гих элементов питания растений [22]. В осадке пылеуловителя, установленного в лесополосе из сосны близ с. Лучаново, содержание гумуса до 10,5 %, что

значительно превышает его концентрацию в верхних слоях почв пашни, разделенных этой лесополосой. В верхних горизонтах почвы лесополосы содержание гумуса достигает 9 %.

Заключение

Наши 32-летние наблюдения показывают, что в холодный период года золовые процессы в агроландшафтах юго-востока лесной зоны Западно-Сибирской равнины проявляются ежегодно, но с разной степенью интенсивности. Наиболее активно они развиваются в малоснежные годы. За период 1989–2019 гг. очень сильная аккумуляция золового осадка в снежной толще (500–1000 г/м) отмечалась в 10 % случаев; сильная (200–500) – в 26,7 % случаев; средняя (100–200) – в 10 %; умеренная (50–100) – в 10 % и слабая (менее 50) – в 43,3 %. Весьма активен этот процесс во время снеготаяния, когда за одни сутки в

золовых волнах местами накапливается до 23,6 г/м наноса, а за 3 суток – 224,5 г/м. Таким образом, в агроландшафтах холодного периода года возможно возникновение местных пыльных бурь весной.

В гранулометрическом составе золового наноса преобладает пыль, в минералогическом – кварц и мусковит. Золовые отложения содержат значительное количество элементов питания растений – гумуса – до 10 %

Не исключая притока атмосферных выпадений, обусловленных антропогенной деятельностью, в том числе и близлежащих регионов [23–26], считаем, что основная масса золового осадка ключевых участков (юго-восток Томской области) в холодное время года имеет локальное происхождение, об этом свидетельствует большое сходство его гранулометрического, химического и минералогического состава с почвами региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустыня Гоби удобряет Калифорнию // Наука и жизнь. 2017. № 7. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/31704/> (дата обращения 10.01.2020).
2. Pan Y.P., Wang Y.S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015. – V. 15. – P. 951–972.
3. Говорушко С.М. Золовые процессы и их роль в жизни общества // *Геоморфология*. – 2007. – № 3. – С. 37–45.
4. Bagnold R.A. The physics of Blown sand and desert dunes. – London: Methuen, 1941. – 265 p.
5. Mellor M. Cold regions science and engineering. P. II. Blowing snow. – Hanover: CRREL Publ., 1965. – 78 p.
6. Reheis M.S. Dust deposition in Nevada, California, and Utah, 1984–2002 // U.S. Geological Survey. 2003. URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-138/> (дата обращения 15.02.2020).
7. Dust deposition near an eroding source field / L.J. Hagen, S. Van Pelt, T.M. Zobek, A. Retta // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2007. – V. 32. – P. 281–289.
8. Lancaster N. Aeolian features and processes // *Geological Monitoring*. – Boulder: Geological Society of America, 2009. – P. 1–25.
9. Munroe J.S. Properties of modern dust accumulating in the Uinta Mountains, Utah, USA, and implications for the regional dust system of the Rocky Mountains // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2014. – V. 39. – P. 1979–1988.
10. Сажин А.Н., Васильев Ю.И. Географические закономерности современной дефляции в степях Восточной Европы и Западной Сибири // *Геоморфология*. – 2003. – № 1. – С. 79–82.
11. Золовый морфолитогенез и современный климат Евразии (ст. 1. Динамика атмосферы, блокирующие и золовые процессы) / А.Н. Сажин, Ю.И. Васильев, В.П. Чичагов, Г.А. Ларионов // *Геоморфология*. – 2012. – № 3. – С. 10–20.
12. Золовый морфолитогенез и современный климат Евразии (ст. 2. Катастрофические золовые процессы, динамические различия золовых процессов современной и ледниковой эпох) / А.Н. Сажин, Ю.И. Васильев, В.П. Чичагов, Г.А. Ларионов // *Геоморфология*. – 2013. – № 2. – С. 3–14.
13. Лессовый покров Земли и его свойства / В.Т. Трофимов, С.Д. Балыкова, Н.С. Болиховская, Т.В. Андреева, Б.А. Алексеев, В.Ф. Болиховский, А.Е. Додонов, Ю.Г. Ермаков, А.В. Ершова, Э.В. Кадыров, Т.А. Ковалева, Т.И. Кондратьева, Е.Ю. Любимцева, А.В. Минервин, С.Г. Миронюк. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. – 464 с.
14. Бельгибаев М.Е. Типология золовых процессов и их влияние на геосферу и ландшафты // *Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН*. – Симферополь, 2016. – Т. 1. – С. 15–20.
15. Кадастр возможностей / А.М. Данченко, Г.О. Задде, А.А. Земцов, В.А. Земцов, Л.И. Инишева, Б.В. Лукутин, А.В. Мезенцев, С.Г. Маслов, А.Д. Назаров, С.Г. Обухов, В.В. Севастьянов, Л.М. Севастьянова, В.И. Слуцкий. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 280 с.
16. Середина В.П., Спирина В.В. Почвообразование в подтаежной зоне Западной Сибири. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 284 с.
17. Современный золовый морфолитогенез холодного периода года на юго-востоке зоны подтайги Западно-Сибирской равнины / Н.С. Евсеева, З.Н. Квасникова, М.А. Каширо, А.С. Батманова // *Геосферные исследования*. – 2017. – № 2. – С. 6–13.
18. Евсеева Н.С., Безгодова О.В. Оценка дефляционной опасности почв лесной зоны юго-востока Западно-Сибирской равнины // Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование. Труды шестой международной научно-практической конференции. – М.: Буки-Веди, 2018. – С. 263–268.
19. Аристархова Л.Б. Золовые процессы и морфолитогенез // *Динамическая геоморфология* / под ред. Г.С. Ананьева, Ю.Г. Симонова, А.И. Спиридонова. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – С. 323–351.
20. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почв и запыление воздуха. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 240 с.
21. Кальянов К.С. Динамика процессов ветровой эрозии почвы. – М.: Наука, 1976. – 143 с.
22. Скорости седиментации золовой пыли в лесополосах на пашне подтайги юго-востока Западно-Сибирской равнины / Н.С. Евсеева, З.Н. Квасникова, А.С. Батманова, М.А. Каширо, В.В. Назаров, О.Э. Мерзляков // *Географический вестник*. – 2016. – № 3 (38). – С. 5–15.
23. Mezhibor A.M., Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P. Accumulation and average contents of trace elements in the high-moor peat of Tomsk region (Western Siberia, Russia) // *Energy Exploration and Exploitation*. – 2009. – V. 27 (6). – P. 401–410.
24. Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M. Epiphytic lichens as indicators of air pollution in Tomsk Oblast (Russia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21. – 012043.
25. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, E.A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T.S. Shakhova // *Environmental Technology (United Kingdom)*. – 2018. – V. 39. – Iss. 18. – P. 2288–2303.
26. Comparative estimation of geochemical activity of the atmosphere according to the ratio of compositions of different near-ground aerosol fractions at the fonovaya observatory in Autumn 2016 / B.D. Belan, D.V. Simonenkov, A.V. Talovskaya, M.P. Tentyukov, A.V. Fofonov, E.G. Yazikov // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2018. – V. 31. – Iss. 1. – P. 36–42.

Поступила 15.10.2020 г.

Информация об авторах

Евсеева Н.С., доктор географических наук, заведующая кафедрой географии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

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

Квасникова З.Н., кандидат географических наук, доцент кафедры географии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Батманова А.С., ассистент кафедры географии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Бучельников В.С., аспирант Отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.4.042+551.4.022+559.462

PRESENT-DAY AEOLIAN MORPHOLITHOGENESIS: STATE OF KNOWLEDGE AND REGIONAL MANIFESTATIONS

Nina S. Evseyeva¹,
nsevseyeva@yandex.ru

Egor G. Yazikov²,
yazikoveg@tpu.ru

Zoya N. Kvasnikova¹,
zojkw@rambler.ru

Antonina S. Batmanova¹,
tonu6ka@yandex.ru

Viktor S. Buchelnikov²,
victor.buchelnikov@yandex.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

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

The relevance of the research of exogenous processes, including deflation, is caused by both positive and negative impact of the processes on landscape components and economic activity. Besides, features of regional material migration under the action of aeolian processes, the accumulation intensity of deposits, and their material composition are poorly understood. Environmental conditions and anthropogenic impact cause the development of wind erosion and deflation in geosystems of Tomsk region.

The main aim of this study is to estimate accumulation intensity of aeolian deposits and determine its material composition for the landscapes in the southeast of Tomsk region.

Objects of the research are natural and anthropogenic landscapes of the Tom-Yaya interfluvium within the Basandayka river basin (the right tributary of the Tom river).

Methods: field measurements with sampling, laboratory analyses, analytical studies.

Results of the study have revealed based on long-term observations that aeolian processes in the agricultural landscapes of the southeast of the forest zone in the West Siberia appear annually. The intensity of the processes has a variety from year to year and reaches the maximum values in dry winters. Dust prevails in the grain size distribution of aeolian deposits. Quartz and muscovite are dominant in total mineral composition. Aeolian deposits contain a significant amount of plant nutrients (humus – up to 10 %) in many cases. The authors consider that the bulk of the aeolian deposits within the key area (southeast of the Tomsk region) in the cold season has a local origin. The strong similarity of the grain size distribution, chemical and mineral compositions of deposits with soils of the area are indicative of that.

Key words:

Deflation, aeolian processes, Tomsk region, Tom-Yaya interfluvium, dust trap, arable land.

REFERENCES

1. Pustynya Gobi udobryaet Kaliforniyu [The Gobi Desert fertilizes California]. *Nauka i zhizn*, 2017, vol. 7. Available at: <https://www.nkj.ru/archive/articles/31704/> (accessed 10 January 2020).
2. Pan Y.P., Wang Y.S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, vol. 15, pp. 951–972.
3. Govorushko S.M. Aeolian processes and their role in human conditions. *Geomorfologiya*, 2007, no. 3, pp. 37–46. In Rus.
4. Bagnold R.A. *The physics of Blown sand and desert dunes*. London, Methuen, 1941. 265 p.
5. Mellor M. *Cold regions science and engineering. P. II. Blowing snow*. Hanover, CRREL Publ., 1965. 78 p.
6. Reheis M.S. *Dust deposition in Nevada, California, and Utah, 1984–2002*. U.S. Geological Survey. 2003. Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-138/> (accessed 15 February 2020).
7. Hagen L.J., Van Pelt S., Zobek T.M., Retta A. Dust deposition near an eroding source field. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, vol. 32, pp. 281–289.
8. Lancaster N. Aeolian features and processes. *Geological Monitoring*. Boulder, Geological Society of America, 2009. pp. 1–25.
9. Munroe J.S. Properties of modern dust accumulating in the Uinta Mountains, Utah, USA, and implications for the regional dust system of the Rocky Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, vol. 39, pp. 1979–1988.
10. Sazhin A.N., Vasilev Yu.I. Geograficheskie zakonomernosti sovremennoy deflyatsii v stepyakh Vostochnoy Evropy i Zapadnoy Sibiri [Geographic patterns of modern deflation in the steppes of Eastern Europe and West Siberia]. *Geomorfologiya*, 2003, no. 1, pp. 79–82.
11. Sazhin A.N., Vasilev Yu.I., Chichagov V.P., Larionov G.A. Eolian morphogenesis and recent climate of Eurasia (paper 1. Atmosphere dynamics, blocking and eolian processes). *Geomorfologiya*, 2012, no. 3, pp. 10–20. In Rus.
12. Sazhin A.N., Vasilev Yu.I., Chichagov V.P., Larionov G.A. Eolian morphogenesis and recent climate of Eurasia (paper 2. Disastrous eolian processes, dynamic differences of eolian processes in recent and glacial epochs). *Geomorfologiya*, 2013, no. 2, pp. 3–14. In Rus.
13. Trofimov V.T., Balykova S.D., Bolikhovskaya N.S., Andreeva T.V., Alekseev B.A., Bolikhovskiy V.F., Dodonov A.E., Ermakov Yu.G., Ershova A.V., Kadyrov E.V., Kovaleva T.A., Kondratyeva T.I., Lyubimtseva E.Yu., Minervin A.V., Mironyuk S.G. *Lessovy pokrov Zemli i yego svoystva* [Loess cover of the Earth and its properties]. Moscow, Moscow University Press, 2001. 464 p.

14. Belgibaev M.E. Tipologiya eolovykh protsessov i ikh vliyaniye na geosfery i landshafty [Typology of aeolian processes and their impact on geospheres and landscapes]. *Materialy XXXV Plenuma Geomorfologicheskoy komissii RAN* [Materials of the XXXV Plenum of the Geomorphological Commission of the RAS]. Simferopol, 2016. Vol. 1, pp. 15–20.
15. Danchenko A.M., Zadde G.O., Zemtsov A.A., Zemtsov V.A., Inisheva L.I., Lukutin B.V., Mezentshev A.V., Maslov S.G., Nazarov A.D., Obukhov S.G., Sevastyanov V.V., Sevastyanova L.M., Slutskiy V.I. *Kadastr vozmozhnostey* [Cadastre of opportunities]. Tomsk, NTL Publ. house, 2002. 280 p.
16. Seredina V.P., Spirina V.V. *Pochvoobrazovanie v podtaezhnoy zone Zapadnoy Sibiri* [Soil formation at the subtaiga zone of Western Siberia]. Tomsk, NTL Publ. house, 2005. 284 p.
17. Evseyeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Batmanova A.S. Modern aeolian morpholithogenesis of cold period in the South-East part of the Sub-Taiga Zone of the West Siberian Plain. *Geosphere Research*, 2017, no. 2, pp. 6–13. In Rus.
18. Evseyeva N.S., Bezgodova O.V. Otsenka deflyatsionnoy opasnosti pochv lesnoy zony yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy ravniny [Assessing of soil deflation danger at forest zone in the southeast of the West Siberia Plain]. *Indikatsiya sostoyaniya okruzhayushchey sredy: teoriya, praktika, obrazovaniye. Trudy shestoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Indication of the state of the environment: theory, practice, education. Proceedings of the sixth international scientific and practical conference]. Moscow, Buki-Vedi, 2018. pp. 263–268.
19. Aristarkhova L.B. Eolovye protsessy i morfolitogenez [Aeolian processes and morpholithogenesis]. *Dinamicheskaya geomorfologiya* [Dynamic geomorphology]. Moscow, MGU Publ. house, 1992. pp. 323–351.
20. Gendugov V.M., Glazunov G.P. *Vetrovaya eroziya pochv i zapyleniye vozdukha* [Soil wind erosion, and air dust pollution]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007. 240 p.
21. Kaliyanov K.S. *Dinamika protsessov vetrovoy erozii pochvy* [Dynamics of wind erosion of the soil]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 142 p.
22. Evseyeva N.S., Kvasnikova Z.N., Batmanova A.S., Kashiro M.A., Nazarov V.V., Merzlyakov O.E. Sedimentation rate of aeolian dust in woodland belts on arable land of the sub-boreal forest in the southeast part of the West Siberian plain. *Geograficheskiy vestnik*, 2016, no. 3, pp. 5–15. In Rus.
23. Mezhibor A.M., Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P. Accumulation and average contents of trace elements in the high-moor peat of Tomsk region (Western Siberia, Russia). *Energy Exploration and Exploitation*, 2009, vol. 27, no. 6, pp. 401–410. In Rus.
24. Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M. Epiphytic lichens as indicators of air pollution in Tomsk Oblast (Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, 012043.
25. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C., Kim J., Shakhova T.S. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology* (United Kingdom), vol. 39, Iss. 18, pp. 2288–2303.
26. Belan B.D., Simonenkov D.V., Talovskaya A.V., Tentyukov M.P., Fofonov A.V., Yazikov E.G. Comparative estimation of geochemical activity of the atmosphere according to the ratio of compositions of different near-ground aerosol fractions at the fonovaya observatory in Autumn 2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2018, vol. 31, Iss. 1, pp. 36–42.

Received: 15 October 2020.

Information about the authors

Nina S. Evseyeva, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk State University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Zoya N. Kvasnikova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

Antonina S. Batmanova, assistant, National Research Tomsk State University.

Viktor S. Buchelnikov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 630*6

АЛГОРИТМ МАССОВОЙ КАДАСТРОВОЙ ОЦЕНКИ ЛЕСНЫХ ЗЕМЕЛЬ ПО ТАКСАЦИОННЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ НАСАЖДЕНИЙ

Романчиков Алексей Юрьевич¹,
romanchicov@inbox.ru

Ковязин Василий Федорович¹,
vfkedr@mail.ru

Животягина Нина Ивановна²,
pozhni@mail.ru

Киценко Анастасия Анатольевна¹,
kna1994@bk.ru

Данг Тхи Лан Ань¹,
lananhvtu2@gmail.com

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

² Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии,
Россия 394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, 105.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки единого методического подхода к государственной кадастровой оценке земель лесного фонда. Это необходимо для рационального управления природными ресурсами, установления справедливой платы за пользование лесными землями и обеспечения концепции устойчивого развития лесного комплекса.

Цель: разработать алгоритм массовой кадастровой оценки лесных земель по минимально возможным учетным единицам – таксационным выделам, что позволяет дифференцировать их по качеству. Должна обеспечиваться возможность ее использования по всей России путем учета региональных особенностей заготовки лесных ресурсов.

Методы: дисконтирование денежных потоков от заготовки лесных ресурсов; регрессионный анализ связи между значениями таксационных показателей и продуктивностью лесных ресурсов; геоинформационное моделирование средствами MapInfo; проверка гипотезы о нормальности распределения полученных результатов; обеспечение работы алгоритма кадастровой оценки средствами MS Excel.

Результаты и выводы. Разработан алгоритм определения кадастровой стоимости лесных земель по таксационным выделам средствами MS Excel. Он позволяет определять кадастровую стоимость как повыделно, так и в рамках районных и участковых лесничеств, используя таксационные показатели насаждений в качестве исходных данных. Алгоритм может изменяться путем модульного дополнения дисконтированными денежными потоками от заготовки природных ресурсов, характерных для конкретной лесорастительной зоны. Разработанный алгоритм испытан с использованием таксационных показателей для одного из участковых лесничеств на территории Ленинградской области, учитывая местные особенности заготовки природных ресурсов. Полученные величины удельных показателей кадастровой стоимости распределены по нормальному закону, территориально высокие значения удельных показателей кадастровой стоимости приурочены к выделам с лучшими качественными и количественными таксационными показателями.

Ключевые слова:

Государственная кадастровая оценка, лесные земли, земли лесного фонда, лесные ресурсы, недревесная продукция леса.

Актуальность и цель исследования

Кадастровая оценка позволяет получить количественное представление о качестве земель лесного фонда. Такая информация позволяет принимать взвешенные и сбалансированные решения в сфере управления землями лесного фонда, обеспечивая экологический баланс территорий. В разрезе геотехнологий это важно, в первую очередь, при проектировании предприятий добывающей и обрабатывающей промышленности и маршрутов прохождения трасс линейных сооружений для обеспечения их деятельности. На территории России множество предприятий расположено в таежной зоне, поэтому их строительство напрямую сопряжено с изъятием земель лесного фонда. При раз-

работке проектных решений и выборе наиболее предпочтительного варианта территориального размещения предприятий и объектов инфраструктуры необходимо обеспечить изъятие наиболее малоценных участков лесных земель, чтобы нанести минимальный ущерб экологическому благополучию территорий. Кадастровая стоимость в данном случае – наиболее универсальный показатель, который дает возможность принимать сбалансированные решения и обеспечивать устойчивое развитие осваиваемых территорий [1]. На 1 января 2018 г. [2] земли лесного фонда занимают 66 % в общей структуре земельного фонда Российской Федерации, причем покрытые лесами земли, входящие в эту категорию, занимают 44 % в распределении всех земель государства.

Согласно новому закону «О государственной кадастровой оценке» [3] и утвержденных в дополнение к нему «Методических указаний о государственной кадастровой оценке» [4] государственная кадастровая оценка должна проводиться не по категориям земель как раньше, а по сегментам, характеризующим их использование.

Для покрытых древесной растительностью лесных земель, являющихся частью лесного фонда, которые чаще всего используются для заготовки продукции леса, можно применить сегмент, обозначенный законодателем как «Использование лесов».

Он делится на 4 группы: «Заготовка древесины», «Заготовка лесных ресурсов», «Лесные плантации» и «Резервные леса».

Описание групп приведено недостаточно точно, поэтому жесткое отнесение лесного участка к определенной группе невозможна.

Помимо этого, такое описание групп исключает возможность одновременной заготовки древесины и прочих лесных ресурсов. Стоит отметить, что новая методика предлагает оценивать леса только исходя из их использования для заготовки древесины без учета побочной продукции, а тем более экологической и рекреационной роли леса.

Это является значительным шагом назад, учитывая, что в методике Росземкадастра 2002 г. [5] видов использования предусматривалось намного больше.

В ходе предыдущих исследований [6, 7] нами предложена методика кадастровой оценки лесных земель, покрытых древесной растительностью, для целей их многоцелевого использования. Рассчитывать кадастровую стоимость предлагается как сумму дисконтированных денежных потоков: от заготовки древесины в спелых и перестойных насаждениях; пищевой, недревесной и лекарственной продукции леса на период в два оборота рубки спелых и перестойных насаждений. В качестве исходных данных нами рекомендуется использовать таксационные показатели насаждений и рыночную стоимость лесных и побочных ресурсов.

Важной особенностью нашей методики является тот факт, что оценка проводится для минимальных единиц деления лесного фонда – таксационных выделов, сведения о которых можно получить в таксационных описаниях лесничеств или путем инвентаризации насаждений рассматриваемого лесного участка [7].

Установлено, что значения удельных показателей кадастровой стоимости (УПКС) территориально распределены таким же образом, что и таксационные показатели, применявшиеся при расчетах. Значения УПКС по частоте появления распределены по нормальному закону, что соответствует экспериментальным данным о нормальном распределении таксационных показателей насаждений, если в них не проводились интенсивные рубки ухода [8].

В ходе разработки методики определения кадастровой стоимости лесных земель по выделам с использованием данных о стоимости лесных ресурсов, материалов таксационных описаний перед нами возник вопрос об оптимизации вычислений, поскольку в одном квартале может находиться 40–60 выделов, а на территории лесничества – более 2 тысяч таких лесных участков [9].

Таким образом, при таком количестве данных необходимо выработать алгоритм, который в дальнейшем может быть реализован с помощью программных средств. В нашем случае это будет табличный процессор MS Excel, как один из наиболее распространенных, удобный для редактирования пользователем и обеспечивающий наглядность представления результата и взаимосвязи параметров между собой.

Методы

Представление результатов вычислений в табличной форме позволяет поэтапно и в реальном времени отражать процесс определения удельного показателя кадастровой стоимости, в особенности с учетом того, что исходные материалы таксационных описаний насаждений также являются таблицами.

Расчет УПКС представляется в виде набор отдельных алгоритмов для каждого из дисконтированных денежных потоков (ДДП), использованных при суммировании. Они подробно представлены в предыдущей публикации [7] и иллюстрируют связи между исходными таксационными показателями, промежуточными величинами, которые от них зависят, и служат основой для расчета ДДП, а также отражают итоговые значения, полученные в результате вычислений.

Для расчетов необходимо нормализовать все исходные данные, так как их представление в таксационных описаниях в некоторых случаях сложно поддается программной обработке. Исходные данные, которые применялись при расчетах УПКС, приведены в табл. 1.

Для расчета ДДП от заготовки грибов определяем денежные потоки от ежегодного сбора грибов в период времени от текущего момента до главной рубки, которая будет следовать за ближайшей, с учетом того, что 10 лет после главной рубки урожай грибов минимален [10]. Такой временной промежуток позволяет полностью оценивать весь потенциал участка лесных земель в плане обеспечения урожая грибов. В то же время дисконтирование, приводящее будущие доходы к настоящему времени, для такого продолжительного периода делает будущие значения к концу промежутка практически равными нулю, что дает возможность сравнивать его с «неограниченным количеством оборотов рубки» из модели Фаустманна [11, 12]. Урожайность зависит от типа леса и считается средней за многолетний промежуток времени на крупную единицу площади, что сглаживает сезонные колебания объема сбора продукции. Здесь и далее при расчетах также применяется допущение о том, что рубка спелых и перестойных насаждений на участке будет сплошной и приуроченной к возрасту спелости главной породы [13].

Расчет ДДП от заготовки ягод ведется аналогично с допущением, что сбор ягод не прерывается после проведения главной рубки. Расчет ДДП от заготовки березового сока аналогичен, объем собираемого ресурса принимается из расчета в 10000 литров с 1 гектара для полностью березового древостоя с соответствующими поправками на его долю в составе, заготовка ведется в последние 3 года перед рубкой спелых и перестойных насаждений [10].

Таблица 1. Исходные данные, используемые при расчете УПКС

Table 1. Data used for cadastral value (per unit) calculation

Название/Name	Единицы измерения Measure unit	Диапазон значений, использованных при расчетах Value range used in calculation	Источник данных Data source
Коэффициент состава древостоя Species composition coefficient	Единицы Unit fraction	0–10	Таксационные описания насаждений Forest inventory data
Тип лесорастительных условий Forest type	–	Деление на типы по Сукачеву Forest type by Sukachev	Материалы таксационных описаний Forest inventory materials
Запас древесины Standing volume	м³/га m³ per ha	0–400	Материалы таксационных описаний Forest inventory materials
Возраст древесной породы Species age	Лет/years	0–250	Материалы таксационных описаний Forest inventory materials
Возраст спелости породы Species maturity age	Лет/years	60 для мелколиственных 60 for small-leaved 80 для хвойных и твердолиственных 80 for pine and broad-leaved	Правила заготовки древесины, Лесной план субъекта Российской Федерации Harvest and forestry policies for regions of Russia
Средний диаметр (по породам) Average diameter (by species)	см/cm	5–50	Таксационные описания Forest inventory data
Средняя высота (по породам) Average height (by species)	м/m	5–35	Таксационные описания Forest inventory data
Коэффициент дисконтирования Discount coefficient	%	1–5	Материалы научных исследований Materials of scientific research
Цена единицы ресурса Unit cost	р./ед rub/unit	в зависимости от вида ресурса depending of resource type	Росстат, данные организаций Russian statistical agency, producers data
Рентабельность продажи лесной продукции Profitability of sales	%	в зависимости от вида ресурса depending of resource type	Росстат, данные организаций Russian statistical agency, producers data

Расчет ДДП от заготовки древесины ведется отдельно для хвойных и лиственных пород деревьев вследствие значительного различия в стоимости продуктов их деревообработки. Учитываются основные лесобразующие породы для Ленинградской области – ель, сосна, береза, осина, ольха. Объем древесины определяется исходя из таксационных описаний с учетом прироста древесины на выделе к моменту главной рубки, определяемого по авторским формулам на основе материалов лесотаксационного справочника [14]. Рубка является сплошной и приурочена к возрасту спелости преобладающей породы, после чего считается, что на выделе будет выращен древостой такого же состава и свойств. Значения запаса и возраста для групп пород принимаются средневзвешенными в зависимости от доли конкретной породы в составе насаждения.

ДДП от заготовки хвой рассчитывается исходя из сбора 70 % еловой и сосновой хвой после проведения рубки спелых и перестойных насаждений на выделе. Расчет объема запаса ресурса ведется на основе формул, представленных в работе [10].

Расчет ДДП от заготовки живицы ведется исходя из предположения, что сосновая живица заготавливается в течение 10 лет перед рубкой спелых и перестойных насаждений. Объем подсоски и число карр определяется на основании методики, представленной в работе [10].

Определение ДДП от заготовки коры и бересты осуществляется на основании расчетов [8], согласно которым 13 % от общего запаса древесины в среднем приходится на кору. Заготовка также приурочена к рубке спелых и перестойных насаждений.

Вопрос о величине ставки дисконтирования остается открытым и требует значительного обоснова-

ния – в различных исследованиях она варьируется от 1 до 5 % [15–17]. Нами выбрано значение в 2 % как наиболее часто встречающееся.

Цены на продукцию колеблются со временем и должны ежегодно быть актуализованы. Нами применялись данные из открытых источников и материалов Росстата. Расходная часть при расчете ДДП должна определяться как сумма расходов, возникающих при заготовке древесины, лесохозяйственных мероприятиях, лесовосстановлении и охране леса. Однако здесь мы сталкиваемся с рядом трудностей – не вся указанная выше информация находится в открытом доступе и в виде удельных показателей. Данные из лесных планов не могут полностью отражать картину, поскольку в силу ограниченности бюджетов некоторые мероприятия реализуются не в полном объеме, а определение удельных показателей для таксационных выделов также затруднено.

Из-за неопределенности при учете расходов в расчете ДДП нами было принято допущение о понижении величины доходов от заготовки того или иного ресурса в зависимости от рентабельности его продажи. Источник данных – Росстат или отчеты крупных заготовителей пищевой продукции леса.

Некоторые упомянутые выше величины определяются путем проведения вычислений и зависят от исходных данных. В табл. 2 представлен диапазон значений, которые они принимают, и данные, которые применяются для расчетов.

Диапазон значений, которые принимают определенные нами ДДП, а также взаимосвязь результатов с используемыми промежуточными величинами представлены ниже (табл. 3).

Таблица 2. Промежуточные величины, используемые при расчетах

Table 2. Intermediate values used during calculation

Название/Name	Единицы измерения Measure units	Диапазон значений Value range	Необходимые данные для расчета Necessary data
Преобладающая порода Dominating tree species	–	–	Коэффициент состава древостоя Species composition coefficient
Запас древесины с поправкой на прирост Standing volume corrected by annual increment	м³/га m³ per ha	0–600	Запас древесины; Коэффициент состава древостоя; Возраст породы (по породам) Standing volume Species composition coefficient Age (by species)
Запас грибов (по видам) Mushroom stock (by species)	кг/га kg/ha	0–5,1	Тип лесорастительных условий; Преобладающая порода Forest type Dominating tree species
Прибыль от сбора грибов (по каждому виду) Mushroom harvest profit	р./кг rub/kg	25–130	Цена единицы ресурса (грибы); Рентабельность продажи продукции (грибы) Unit cost (mushrooms) Profitability of sales (mushrooms)
Ежегодная удельная прибыль от заготовки грибов Annual profit from mushroom harvest per ha	р./га rub per ha	0–685	Запас грибов (по видам); Прибыль от сбора грибов (по каждому виду) Mushroom stock (by species) Mushroom harvest profit
Время до главной рубки (преобладающая порода) Time to harvesting (for dominating tree species)	лет/years	0–80	Коэффициент состава древостоя; Возраст породы (по породам); Преобладающая порода; Возраст спелости (по породам) Species composition coefficient Age (by species) Dominating tree species Maturity age (by species)
Ежегодная прибыль от заготовки грибов с учетом рубки главного пользования Annual profit from mushroom harvest considering final felling	р./га rub/ha	0–203	Преобладающая порода; Коэффициент состава древостоя; Время до главной рубки; Ежегодная удельная прибыль от заготовки грибов; Коэффициент дисконтирования Dominating tree species Species composition coefficient Time to harvesting (for dominating tree species) Annual profit from mushroom harvest per ha Discount coefficient
Возраст рубки преобладающей породы Age of dominating tree species felling	лет/years	60, 80	Преобладающая порода Dominating tree species
Удельный запас вида ягод на выделе Berry stock (by species)	кг/га kg/ha	0–40	Тип лесорастительных условий; Преобладающая порода Forest type Dominating tree species
Прибыль от заготовки ягод (по видам) Profit from berry species harvest	р./кг rub/kg	11–36	Цена единицы ресурса (ягоды); Рентабельность продажи продукции (ягоды) Unit cost (berries) Profitability of sales (berries)
Ежегодная удельная прибыль от заготовки ягод Annual berry harvest profit per ha	р./га rub per ha	0–915	Удельный запас вида ягод на выделе; Прибыль от заготовки ягод (по видам) Berry stock (by species) Profit from berry species harvest
Запас хвой (сосна) Needle stock (pine)	кг/га kg per ha	0–13965	Запас древесины (сосна) с поправкой на прирост; Средний диаметр сосны на выделе Standing volume corrected by annual increment for pine species Average pine diameter for forest site
Запас хвой (ель) Needle stock (fir)	кг/га kg per ha	0–18706	Запас древесины (ель) с поправкой на прирост; Средний диаметр (ель) Standing volume corrected by annual increment (fir) Average diameter (fir)
Годовой объем заготовки березового сока Annual volume of birch sap harvest	л/га l/ha	0–9000	Коэффициент состава древостоя (береза) Species composition coefficient (birch)
Число карп/Number of blazes	ед/units	0–19	Средний диаметр (сосна)/Average diameter (pine)
Сумма площадей сечений абсолютно полного древостоя Basal area of full stand	м²/м²	3,54–35,45	Средняя высота (сосна); Коэффициент состава древостоя (сосна) Pine average height Species composition coefficient (pine)
Запас коры, запас бересты Bark stock and birch bark stock	кг/га kg per ha	9,82–96,31	Запас древесины с поправкой на прирост (все породы) Standing volume corrected by annual increment (all species)

Таблица 3. Полученные значения ДДП от заготовки различных видов продукции леса и необходимые величины для их расчета

Table 3. DCF values got from different forest resources harvesting and necessary values for calculation

Название/Name	Единица измерения Measure unit	Необходимые данные для расчета Necessary data	Диапазон значений, полученных в результате расчетов Results range
ДДП – заготовка древесины (по породам) DCF – timber harvest (by species)	p./га rub/ha	Возраст главной рубки преобладающей породы; время до главной рубки; цена единицы ресурса (древесина); запас древесины с учетом текущего прироста (по породам); коэффициент дисконтирования; рентабельность продажи заготовленной древесины Age of dominating tree species felling; Time to harvesting (for dominating tree species); Unit cost (timber); Standing volume considering annual increment (by species); Discount coefficient; Profitability of sales (timber)	0–35000
ДДП – заготовка грибов DCF – mushroom harvest	p./га rub per ha	Ежегодная прибыль от заготовки грибов с учетом рубки главного пользования; возраст рубки преобладающей породы; преобладающая порода; время до главной рубки Annual profit from mushroom harvest considering final felling; Age of dominating tree species felling; Dominating tree species; Time to main harvest	0–16000
ДДП – заготовка ягод DCF – berry harvest	p./га rub/ha	Возраст главной рубки преобладающей породы; время до главной рубки; годовая прибыль от заготовки ягод на выделе; коэффициент дисконтирования Age of dominating tree species felling; Time to main harvest; Annual profit from berry harvest; Discount coefficient	0–19200
ДДП – заготовка хвои DCF – needle harvest	p./га rub/ha	Возраст главной рубки преобладающей породы; время до главной рубки; запас сосновой и еловой хвои; цена единицы ресурса (хвоя); коэффициент дисконтирования; рентабельность продажи продукции (хвои от лесозаготовки) Age of dominating tree species felling; Time to main harvest; Unit cost (needle); Discount coefficient; Profitability of sales (needle)	0–4500
ДДП – заготовка березового сока DCF – birch sap harvest	p./га rub/ha	Возраст главной рубки преобладающей породы; цена единицы ресурса (березовый сок); годовой объем заготовки березового сока; время до главной рубки; коэффициент дисконтирования; рентабельность продажи продукции (березовый сок) Age of dominating tree species felling; Unit cost (birch sap); Annual volume of birch sap harvest; Time to main harvest; Discount coefficient; Profitability of sales (birch sap)	0–32700
ДДП – заготовка живицы DCF – galipot harvest	p./га rub/ha	Возраст главной рубки преобладающей породы; цена единицы ресурса (живица); число карр подсочки; сумма площадей сечений древостоя; время до главной рубки; коэффициент дисконтирования; рентабельность продажи продукции (живица) Age of dominating tree species felling; Unit cost (galipot); Number of blazes; Basal area of full stand; Time to main harvest; Discount coefficient; Profitability of sales (galipot)	0–1500
ДДП – заготовка коры и бересты DCF – bark harvest	p./га rub/ha	Возраст главной рубки преобладающей породы; цена единицы ресурса (кора и береста); запас коры и бересты; время до главной рубки; коэффициент дисконтирования; рентабельность продажи продукции (кора и береста) Age of dominating tree species felling; Unit cost (bark); Bark stock; Time to main harvest; Discount coefficient; Profitability of sales (bark)	2100–6100

Результаты

Расчет урожайности проводился согласно работам отечественных исследователей, изучавших таежную зону Северо-Запада Российской Федерации [10]. Текущий прирост рассчитан на основании авторской адаптации материалов лесотаксационных справочников [14]. Вычисление ДДП проводилось по авторской методике [7], которая является модификацией модели Фаустманна и методики Росземкадастра 2002 г.

Вычисления проводились для каждого выдела отдельно. Использование табличного процессора обеспечило наглядное представление о промежуточных расчетах и динамическом изменении всех промежуточных величин. Это дает возможность оперативно выявлять ошибки в расчетных формулах, некорректные исходные данные, анализировать полученные результаты. Гибкость работы с процессором позволяет быстро корректировать алгоритм при изменениях

структуры расчетов, добавлении новых источников дисконтированных денежных потоков, легко модифицировать способ представления информации.

В качестве апробации алгоритма использованы материалы таксационных описаний Линдуловского участкового лесничества Рошинского районного лесничества. Взяты данные по 150 выделам, и проведен расчет УПКС для каждого из них как сумма ДДП от потенциального использования различных лесных ресурсов. Результат выполнения вычислений приведен на рисунке. Приведены значения таксационных показателей, используемых как исходные данные, и полученные УПКС как результат суммирования ДДП от заготовки описанных выше ресурсов. В скрытой части таблицы (между столбцами Z и DB) рассчитываются все промежуточные величины и значения ДДП, вводятся единые для всех выделов величины (ставка дисконтирования, цены на единицу продукции и т. д.).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	DB		
1			доля пород					возраст пород					высота					диаметр											
2	выдел	площадь	E	C	B	Ол	Ос	E	C	B	Ол	Ос	E	C	B	Ол	Ос	E	C	B	Ол	Ос	запас, м3/га	ТЛУ	домин. порода	тип леса	УПКС		
3	1	0.2	6	1	3	0	0	65	65	50			20	19	18			24	24	18			232	К	Е	ЕК	60006.842		
4	2	0.1	7	0	3	0	0	60		50			22	19				24	18				268	К	Е	ЕК	67797.215		
5	3	0.8	7	1	1	0	0	70	65	55			23	20	20			26	24	20			286	К	Е	ЕК	56301.13		
6	4	0.2	2	1	3	4	0	65	65	60	56		21	19	19	18		26	26	22	20		123	ТТО	Ол	ОлТТО	31194.799		
7	5	1.3	5	1	3	0	1	60	60	55		60	19	19	19		20	22	22	20		24	151	Ч	Е	ЕЧ	55945.45		
8	6	0.9																											
9	7	0.6	3	0	5	0	2	70		50		50	21		18		20	18		26		24	172	Ч	Б	БЧ	56799.395		
10	8	0.1	10	0	0	0	0	75					23					26					261	К	Е	ЕК	50283.541		
11	9	3.3	2	0	6	0	2	50		50		50	19		18		20	20		20		24	172	Ч	Б	БЧ	67290.516		
12	10	0.9	0	1	6	2	1	70	70	65	60		20	20	19	20		26	20	22	26	160	ТТО	Б	БТТО	28660.589			
13	11	2	5	2	2	0	1	80	75	65		60	23	20	19		21	26	24	20		26	268	Ч	Е	ЕЧ	56341.25		
14	12	1.4	5	3	2	0	0	65	55	50			17	17	16			20	20	16			197	Ч	Е	ЕЧ	63239.653		
15	13	1.1	5	0	3	0	2	80		65		60	22		19		20	26		20		26	268	Ч	Е	ЕЧ	52897.363		
16	14	1.7	2	1	4	0	3	65	65	55		55	21	19	19		21	26	24	20		26	186	Ч	Б	БЧ	56285.738		
17	15	2.6	0	3	5	0	2	65	55		50		21	22		23		24	22		24	215	Ч	Б	БЧ	64975.325			
18	16	0.6	4	0	6	0	0	65		55			21		19			26		20			160	Ч	Б	БЧ	62040.102		
19	17	2.9	2	3	5	0	0	60	60	55			20	19	19		24	24	18				224	Ч	Б	БЧ	74097.896		
20	18	0.3	0	1	9	0	0	70	50				17	17				22	16			124	ТТО	Б	БТТО	49569.415			
21	1	1.6	0	10	0	0	0	50					14					16					160	Б	С	СБ	64634.769		
22	2	1.5	4	6	0	0	0	60	60				21	19				22	22				237	Ч	С	СЧ	59736.022		
23	3	0.4	4	6	0	0	0	60	60				19	19				22	22				224	Ч	С	СЧ	57430.038		
24	4	0.7	5	0	1	3	1	80		65	65	60	23		20	18	21	26		20	22	21	268	К	Е	ЕК	43325.036		
25	5	0.8	6	4	0	0	0	70	65				20	20				24	22				214	Ч	Е	ЕЧ	51679.724		
26	6	0.5	5	3	2	0	0	55	60	50			18	18	17			20	22	16			214	Ч	Е	ЕЧ	60836.94		

Рисунок. Результаты работы алгоритма в MS Excel (снимок с экрана)

Figure. Results of algorithm processing (MS Excel screenshot)

После проведения расчетов можно определить средние и медианные значения показателей по всем выделам, определить максимальные и минимальные значения. В дальнейшем это помогает проверить гипотезу о нормальности распределения полученных значений УПКС, что соответствует результатам наблюдений отечественных ученых [8] о нормальности распределения таксационных показателей в естественных древостоях. В ходе апробации полученные значения УПКС варьировались от 20000 до 80000 р./га, среднее значение составило 50800 р./га, медианное – 53000 р./га.

Выводы

Выработка алгоритма кадастровой оценки – безусловно, важный и необходимый процесс, особенно применимый к участкам, предназначенным для лесопользования. В западных странах программное обеспечение подобного рода широко распространено – Forestry DSS – системы для помощи при управлении лесным хозяйством, разработаны во многих университетах, а 5–7 наиболее популярных из них получают широкое применение [18, 19].

Они обеспечивают возможность пространственного анализа данных, расчета продолжительности оборотов рубки, определения чистого дисконтированного дохода от использования лесных ресурсов тем или иным способом.

Данное исследование представляет собой основу для разработки собственной системы принятия решений, учитывающей особенности управления российским лесным хозяйством, а именно отсутствием частной собственности на земли лесного фонда и общей

неразвитостью рынка и системы организации заготовок некоторых видов лесных ресурсов.

Важным направлением развития является совершенствование самой методики. В предлагаемой методике основной акцент делается на эксплуатационное использование лесов. Экологическая и рекреационная роли леса имеют значительный экономический эффект, однако величина его является дискуссионным вопросом [20, 21]. В дальнейшем они будут включены в алгоритм как одни из слагаемых в сумме дисконтированных денежных потоков от использования лесов.

Табличный процессор, помимо описанных выше преимуществ, имеет и ряд недостатков. Для работы в обязательном порядке требуется лицензионное программное обеспечение. Пользователь вынужден взаимодействовать с большим количеством данных на экране, перемещаясь при помощи полос прокрутки, что замедляет процесс. Величины, которые не входят в табличную структуру, но должны быть отображены, их необходимо приводить отдельно от таблицы или в ее теле, что нарушает представление данных. Эта проблема будет решена при написании специализированной программы на объектно-ориентированном языке программирования. Процедуры ввода и вывода данных будут разделены, промежуточные вычисления скрыты, а результаты их доступны при необходимости. Это перспективный путь развития, который мы планируем развивать в дальнейшем.

Также необходимо организовать сбор значительного объема статистической информации о влиянии конкретных лесничеств на экономику региона и интерпретировать полученные данные в денежном выражении. Задача является сложной в том плане, что

необходимо грамотно учесть относительный вклад этих эффектов в суммарный удельный показатель кадастровой стоимости, чтобы он не принимал завышенных значений. Это связано с различными трактовками исследователей вклада лесов в поглощение углерода, поддержание экологического баланса и

здоровья населения. Значения могут варьироваться на порядок в зависимости от взглядов конкретного ученого, поэтому необходимо выработать сбалансированный взвешенный подход, так как полученные значения стоимости непосредственно будут влиять на экономическую и ситуацию в лесном хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлова В.А., Уварова Е.Л. Новейшие технологии в кадастровой деятельности // Записки Горного института. – 2017. – Т. 225. – С. 313–319. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.313
2. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации. URL: <https://rosreestr.ru/site/activity/sostoyanie-zemel-rossii/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-rossiyskoy-federatsii/> (дата обращения: 08.01.2019).
3. О государственной кадастровой оценке: Федеральный закон от 03.07.2016 г. № 237-ФЗ (ред. 29.07.2017) // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200504/ (дата обращения: 14.01.2019)
4. Об утверждении методических указаний о государственной кадастровой оценке: приказ Минэкономразвития от 12.05.2017 № 226 // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_217405/ (дата обращения: 14.01.2019)
5. Об утверждении методики государственной кадастровой оценки земель лесного фонда Российской Федерации: приказ Росземкадастра от 17.10.2002 г. № П/336 // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40052/ (дата обращения 14.01.2019).
6. Kovyazin V., Romanchikov A., Belyaev V. Use of forest inventory data as a new method for cadastral valuation of forestlands in North-West Russia // Forestry Studies – 2014. – V. 61. – P. 69–78.
7. Романчиков А.Ю. Кадастровая оценка покрытых древесной растительностью лесных земель таежной зоны Северо-Запада Российской Федерации при многоцелевом использовании их ресурсного потенциала: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017. – 231 с.
8. Основы лесного хозяйства и таксация леса / Сост. В.Ф. Ковязин, А.Н. Мартынов, Е.С. Мельников и др. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 432 с.
9. Минаев В.Н., Леонтьев Л.Л., Ковязин В.Ф. Таксация леса. – СПб.: Лань, 2017. – 240 с.
10. Грязькин А.В., Кондратенко Н.Н., Пона Д.С. Недревесная продукция леса. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006. – 338 с.
11. Amacher G.S., Ollikainen M., Koskela E. Economics of forest resources. – Massachusetts: The MIT Press, 2009. – 320 p.
12. Forest Resources Assessment 2015. Terms and Definitions. URL: <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf> (дата обращения: 13.01.2019).
13. Kovyazin V., Romanchikov A., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012039. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012039> (дата обращения 13.01.2019).
14. Лесотаксационный справочник по Северо-Западу СССР / под ред. А.Г. Мошалева, Г.М. Давидова, Л.Н. Яновского, В.С. Моисеева, Д.П. Столярова, Ю.И. Бурневского. – Л.: Изд-во Лесотехнической академии, 1984. – 320 с.
15. Brukas V., Mizaras S., Mizaraite D. Economic forest sustainability: comparison between Lithuania and Sweden // Forests. – 2015. – V. 6 (1). – P. 47–64.
16. New Forests. Timberland Investment Outlook, 2013–2017 // New Forests. – Chatswood: New Forests, 2013. – 32 p.
17. Manley B. Discount rates used for forest valuation – results of 2009 survey // New Zealand Journal of forestry. – 2010. – № 54 (4). – P. 19–23.
18. Nobre S., Eriksson L.-O., Trubins R. The use of decision support systems in forest management: analysis of FORSYS country reports // Forests. – 2016. – V. 7 (3). – 72.
19. Pastorella F., Borges G., De Meo I. Usefulness and perceived usefulness of Decision Support Systems (DSSs) in participatory forest planning: the final users' point of view // IForest. – 2016. – V. 9. – P. 422–429.
20. Stenger A., Harou P., Navrud S. Valuing environmental goods and services derived from the forests // Journal of Forest Economics. – 2009. – № 15. – P. 1–14.
21. Gomez A. Natural resources and environmental economic valuation // Revista de Tecnologia – Journal of Technology. – 2008. – V. 7. – № 2. – P. 32–40.

Поступила 16.10.2020 г.

Информация об авторах

Романчиков А.Ю., кандидат технических наук, ассистент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

Ковязин В.Ф., доктор биологических наук, профессор кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

Животягина Н.И., кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии.

Киценко А.А., аспирант кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

Данг Тхи Лан Ань, аспирант кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 630*6

ALGORITHM OF FORESTLAND MASS CADASTRAL EVALUATION USING FOREST INVENTORY DATA

Aleksei Yu. Romanchikov¹,
romanchicov@inbox.ru

Vasily F. Kovyazin¹,
vfkedr@mail.ru

Nina I. Zhivotyagina²,
pozhni@mail.ru

Anastasia A. Kitcenko¹,
kna1994@bk.ru

Lan Anh T. Dang¹,
lananhvtu2@gmail.com

¹ Saint Petersburg Mining University,
2, Vasilyevsky Island 21st line, Saint Petersburg, 199106, Russia.

² All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology,
105, Lomonosov street, Voronezh, 394087, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity of unite state cadastral evaluation method for forestlands in Russia. It is important for rational natural resources management, providing of fair fee for forestland use and for sustainable development of Russian forestry.

The aim of the research is to make an algorithm of mass forestland cadastral evaluation by forest sites. Opportunity of its usage for the whole area of Russia should be provided by taking into account regional peculiarities of forest resources harvesting.

Methods: discounting of cash flows from forest resources harvesting; regression analysis of dependence between forest inventory data and productivity of forest resources; geographic informational modelling using MapInfo; testing of normality distribution hypothesis for obtained results; algorithm application using MS Excel.

Results and discussion. The authors have developed the algorithm of mass forestland cadastral evaluation. It makes possible to calculate cadastral value for both single forest site and whole forest district. Forest inventory data is used as basis for calculation. Algorithm can be modified by addition of discounted cash flows from forest resources harvesting which are special for particular natural zone. Method approbation is provided using forest inventory data of one of the Leningrad region forestry districts (considering regional peculiarities of forest resources harvesting). Obtained values of cadastral magnitudes (per unit) are normal law distributed. High values of cadastral value are spatially correspond to better forest sites.

Key words:

State cadastral evaluation, forestlands, forestry fund lands, forest resources, non-wood forest production.

REFERENCES

1. Pavlova V.A., Uvarova E.L. Newest technology in cadastral activities, *Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 225, pp. 313–319. DOI: 10.18454/pmi.2017.3.313.
2. *Gosudarstvenny (natsionalny) doklad o sostoianii i ispolzovanii zemel v Rossiiskoy Federatsii* [State (national) review of land condition and its usage in Russian Federation]. Available at: <https://rosreestr.ru/site/activity/sostoyanie-zemel-rossii/gosudarstvenny-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-rossiyskoy-federatsii/> (accessed: 8 January 2019).
3. *Gosudarstvennoy kadaastrovoy otsenke* [On state cadastral evaluation]: Federal law 3 July 2016 no. 237-FZ (ed. 29.07.2017) Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200504/ (accessed: 14 January 2019).
4. *Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy o gosudarstvennoy kadaastrovoy otsenke* [On approval of state cadastral evaluation method]: Decree of Ministry of economic development 12 May 2017 no. 226. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_217405/ (accessed: 14 January 2019).
5. *Ob utverzhdenii metodiki gosudarstvennoy kadaastrovoy otsenki zemel lesnogo fonda Rossiiskoy Federatsii* [On approval of state forest fund cadastral evaluation method in the Russian Federation]. Decree of Russian cadastral agency 17 October 2002, no. P/336. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40052/ (accessed 14 January 2019).
6. Kovyazin V., Romanchikov A., Belyaev V. Use of forest inventory data as a new method for cadastral valuation of forestlands in North-West Russia. *Forestry Studies*, 2014, vol. 61, pp. 69–78.
7. Romanchikov A.Y. *Kadaastrovaya otsenka pokrytykh drevsnoy rastitelnosti lesnykh zemel taizhnoy zony Severo-Zapada Rossiiskoy Federatsii pri mnogotselovom ispolzovanii ikh resursnogo potentsiala*. Diss. Kand. nauk [Cadastral evaluation of wooded forestland in the taiga zone of North-West Russia for multipurpose use of its resource potential. Cand. Diss.]. Saint Petersburg, 2017. 231 p.
8. Kovyazin V.F., Martynov A.N., Melnikov E.S. *Osnovy lesnogo khozyaystva i taksatsiya lesa* [Basics of forestry and forest inventory]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2012. 432 p.
9. Minaev V.N., Leontyev L.L., Kovyazin V.F. *Taksatsiya lesa* [Forest inventory]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2017. 240 p.
10. Gryazkin A.V., Kondratenko N.N., Pona D.S. *Nedrevsnaya produktiya lesa* [Non-wood production of forests]. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2006. 338 p.
11. Amacher G.S., Ollikainen M., Koskela E. *Economics of forest resources*. Massachusetts, The MIT Press, 2009. 320 p.
12. *Forest resources assessment 2015. Terms and definitions*. Available at: <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf> (accessed: 13 January 2018)
13. Kovyazin V., Romanchikov A., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastral appraisal estimated with regards to wood and

- food resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012039. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012039> (accessed 13 January 2019).
14. Moshkalev A.G., Davidov G.M., Yanovskiy L.N. *Lesotaksatsionny spravochnik po Severo-Zapadu SSSR* [Forest inventory reference book for the North-West of USSR]. Leningrad, Forest technical academy Publ., 1984. 320 p.
 15. Brukas V., Mizaras S., Mizaraitė D. Economic forest sustainability: comparison between Lithuania and Sweden. *Forests*, 2015, vol. 6 (1), pp. 47–64.
 16. New forests – Timberland Investment Outlook, 2013–2017. *New Forests*. Chatswood, New Forests, 2013. 32 p.
 17. Manley B. Discount rates used for forest valuation – results of 2009 survey. *New Zealand Journal of forestry*, 2010, no. 54 (4), pp. 19–23.
 18. Nobre S., Eriksson L.-O., Trubins R. The use of decision support systems in forest management: analysis of FORSYS country reports. *Forests*, 2016, vol. 7 (3), 72.
 19. Pastorella F., Borges G., De Meo I. Usefulness and perceived usefulness of Decision Support Systems (DSSs) in participatory forest planning: the final users' point of view. *IForest*, 2016, vol. 9, pp. 422–429.
 20. Stenger A., Harou P., Navrud S. Valuing environmental goods and services derived from the forests. *Journal of Forest Economics*, 2009, no. 15, pp. 1–14.
 21. Gomez A. Natural resources and environmental economic valuation. *Revista de Tecnologia – Journal of Technology*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 32–40.

Received: 16 October 2020.

Information about the authors

Aleksei Yu. Romanchikov, Cand. Sc., assistant professor, Saint Petersburg Mining University.

Vasily F. Kovyazin, Dr. Sc., professor, Saint Petersburg Mining University.

Nina I. Zhivotyagina, Cand. Sc., senior fellow, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology.

Anastasia A. Kitcenko, postgraduate student, Saint Petersburg Mining University.

Lan Anh T. Dang, postgraduate student, Saint Petersburg Mining University.

УДК 624.131

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАРСТООПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

Ежкова Алёна Викторовна²,
alyona7@inbox.ru

Леонова Анна Владимировна¹,
avleopova@tpu.ru

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

² ООО «Газпром Инвест»,
Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 39.

Актуальность работы обусловлена строительством магистрального газопровода в южной Якутии. Район характеризуется сложными природно-климатическими условиями, слабой инженерно-геологической изученностью, широким развитием карстующихся пород, малой численностью населения. Учитывая недостаточность данных наблюдений за карстом, особую важность приобретает привлечение данных дистанционного зондирования территории для изучения зон повышенной трещиноватости пород, в частности линеаментный анализ. Линеамент на космоснимке – это линейно-полосчатая текстура снимка, которая на местности отражает особенности геологической структуры, такие как зоны разрывных нарушений, трещин и дробления горных пород, с которыми связана максимальная проницаемость земной коры для тепломассопереноса и миграции газовых и жидких растворов. Последнее обстоятельство открывает путь к оценке и прогнозу не только перспективности территории на наличие полезных ископаемых, но и опасности развития экзогенных геологических процессов, таких как линейной эрозии, карста, оползней. Физическая природа связи линеаментов и проявлений карста позволяет применять линеаментный анализ при оценке условий строительства сооружений на закарстованных территориях.

Цель работы: понять пространственное распределение линеаментов, их ориентацию, плотность, как факторов, влияющих на развитие карстового процесса.

Методика. Основное внимание в исследовании уделяется вопросу извлечения линеаментов в пределах трассы магистрального газопровода с помощью цифровой модели рельефа. Линеаменты извлекались и анализировались в программах Geomatica и ArcGIS соответственно.

Результаты. Использование современных технологий выделения линеаментов на космических снимках открывает новые возможности для изучения геологического строения территории. Составлены карты распространения линеаментов и их плотности на исследуемой области. Информация по структурно-тектоническим условиям территории и полученные результаты линеаментного анализа использованы для оценки карстовой опасности района проложения трассы.

Ключевые слова:

Магистральные газопроводы, оценка риска, линеамент, геоинформационные системы, карст.

Введение

Значительная часть территории южной Якутии, где проходит трасса магистрального газопровода, характеризуется распространением карстующихся пород, при этом многолетние наблюдения за карстом отсутствуют, т. к. территория является малонаселенной. Присутствие карстующихся пород в геологическом разрезе усложняет условия строительства и эксплуатации сооружений и требует оценки степени карстовой опасности.

Одним из условий развития карста является возможность движения подземных вод. Как правило, путями движения подземных вод являются трещины, наличие которых в свою очередь зависит от тектонической обстановки территории. Указанное обстоятельство неоднократно описано разными авторами. Так, например, А.И. Печеркин, Г.Б. Болотов, В.Н. Катаев отмечают, что зоны повышенной трещиноватости, такие как своды положительных структур,

их крутые крылья, приразрывные участки, имеют максимальную закарстованность [1]. При исследовании территории г. Кунгур отмечено, что с зонами повышенной трещиноватости могут быть связаны зоны локальной проницаемости карстового массива, зоны локализации стока подземных вод в условиях активного водообмена. И с учетом основного свойства массива горных пород, а именно – растворяться при контакте с недонасыщенными подземными водами, указанные зоны, могут быть активны с позиции карстообразования [2].

Для выделения зон повышенной трещиноватости перспективно проведение линеаментного анализа района. Линеаментный анализ – эффективный комплекс геоморфологических, геологических, дистанционных и других методов геологического картирования и мониторинга опасных геологических процессов. Базовыми объектами анализа являются линеаменты, вытянутые в одном направлении линейные элементы рельефа и геологической структуры. Линии

проводят по набору диагностических признаков на геолого-геоморфологических картах, разрезах, блок-диаграммах, схемах и моделях [3]. Следует заметить, что на текущий момент не существует однозначного определения термина «линеамент», их однозначной классификации, а также, что базовые приемы изучения линеamentов в практике инженерных изысканий на закарстованных территориях связаны в отечественной карстологической практике, в основном с работами пермских карстоведов [4–6].

Для проведения линеamentного анализа в настоящее время широко используются автоматизированные методы, это объясняется достоверностью получаемых результатов, свободных от субъективных ошибок дешифрирования [7–14]. В первую очередь, это относится к анализу рисунка хребтов и долин в цифровых моделях рельефа (ЦМР). Преимущество анализа цифровой модели рельефа заключается в том, что в анализе участвуют только элементы рельефа и исключены яркостные аномалии, обусловленные другими источниками, такими как растительность и техногенные объекты.

Целью данного исследования является определение пространственного распространения линеamentов, их ориентации и плотности по трассе магистрального газопровода.

Исследование включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях, выполненных в 2012 г. [15], инженерно-геологическое типологическое картогра-

фирование трассы, проведенное в 2016 г. в отделении геологии ТПУ [16–20]. Для выделения зон повышенной трещиноватости по данным дистанционного зондирования использовались данные, полученные при помощи космического термоэмиссионного и отражающего радиометра ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), отраженные в GDEM (Global Digital Elevation Model) – глобальной цифровой модели рельефа. Данные были загружены при помощи бесплатного сервиса «NASA Earthdata Search», использовалась версия цифровой модели рельефа «Aster GDEM V003». Их обработка проводилась осенью 2019 г. в отделении геологии ТПУ с помощью «ArcGIS Desktop». Учитывая, что в рельефе линеamentы выражаются закономерно ориентированными зонами, образованными прямолинейными границами горных хребтов и кражей, берегов озер и крупных болот, спрямленными участками речных и ледниковых долин, цепочками просадок различного генезиса и т. п., анализ базируется на автоматизированном выделении таких зон по ЦМР [8–14].

Для выяснения природы линеamentов, как отражающих линейные структуры глубинного строения, использовался совместный анализ результатов обработки ЦМР и данных, полученных традиционными геолого-геофизическими методами. С этой целью результаты сопоставлялись с картами геологическими, геоморфологическими, четвертичных отложений и другими.

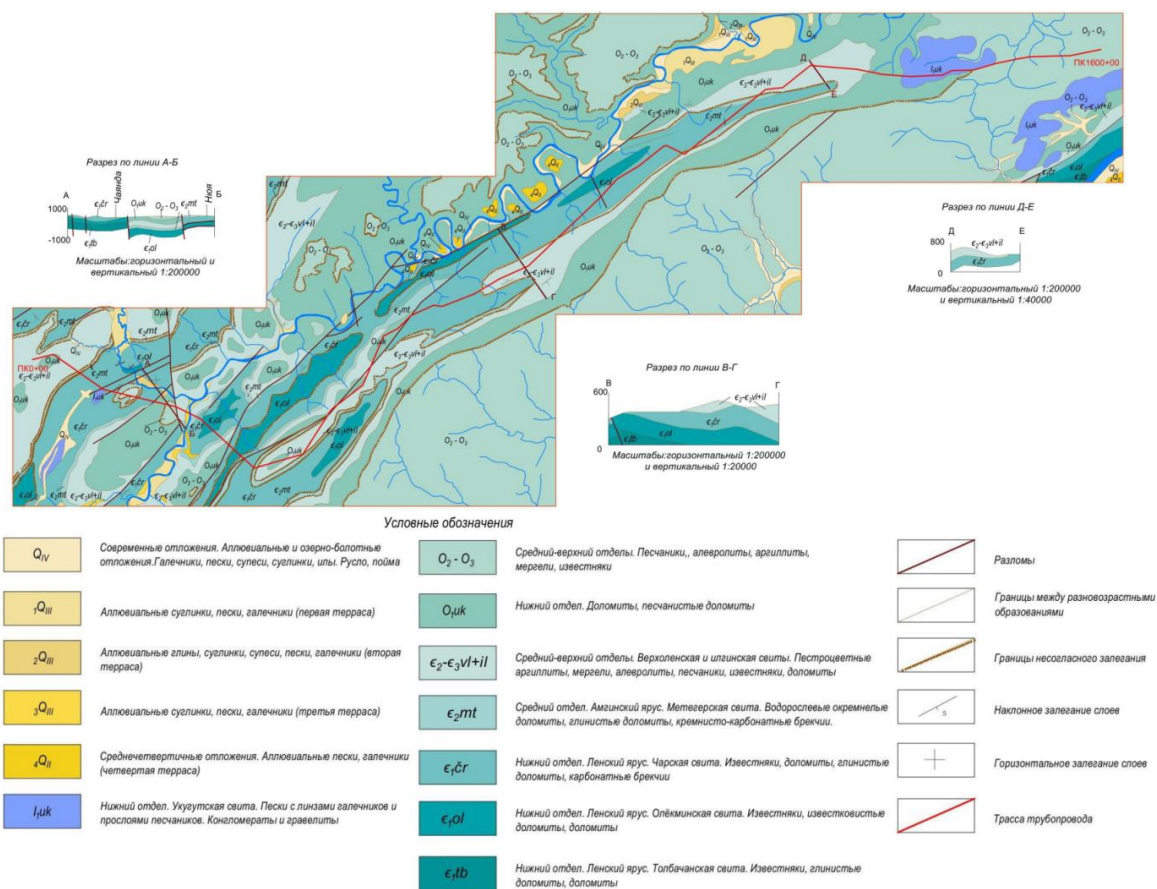


Рис. 1. Схема маршрута газопровода на геологической карте (масштаб 1:40000)

Fig. 1. Gas pipeline route scheme on the geological map (at 1:40000 scale)

Характеристика природных условий территории

Климат района резко континентальный, с характерно холодной зимой, жарким летом, незначительным количеством осадков и значительным перепадом температур в течение года. Незначительный снежный покров и исключительно низкие зимние температуры способствуют широкому распространению многолетней мерзлоты.

По орогидрографическому делению исследуемый район расположен на Приленском плато Среднесибирского плоскогорья, в бассейне левобережных притоков верхнего и среднего течения р. Лены. Детальная характеристика природных условий района трассы приведена в работах [16, 20].

Более подробно остановимся на описании структурно-тектонических условий района. Трасса газопровода расположена в южной части Сибирской платформы, начинается в пределах Непского свода Непско-Ботуобинской антеклизы и заканчивается в пределах Предпатомского прогиба. Территория сложена отложениями кембрия и ордовика (рис. 1), смятыми в протяженные гребневидные складки, простирающиеся в северо-восточном направлении. Складки осложнены многочисленными разрывами, преимущественно надвигами, падающими на юго-восток.

Трасса газопровода пересекает следующие основные тектонические зоны: Пеледуй-Олдонскую антиклинальную зону, Нюйскую синклиналичную зону, Средненюйскую антиклинальную зону, Нюйско-Хамаринскую синклиналичную зону (рис. 2).

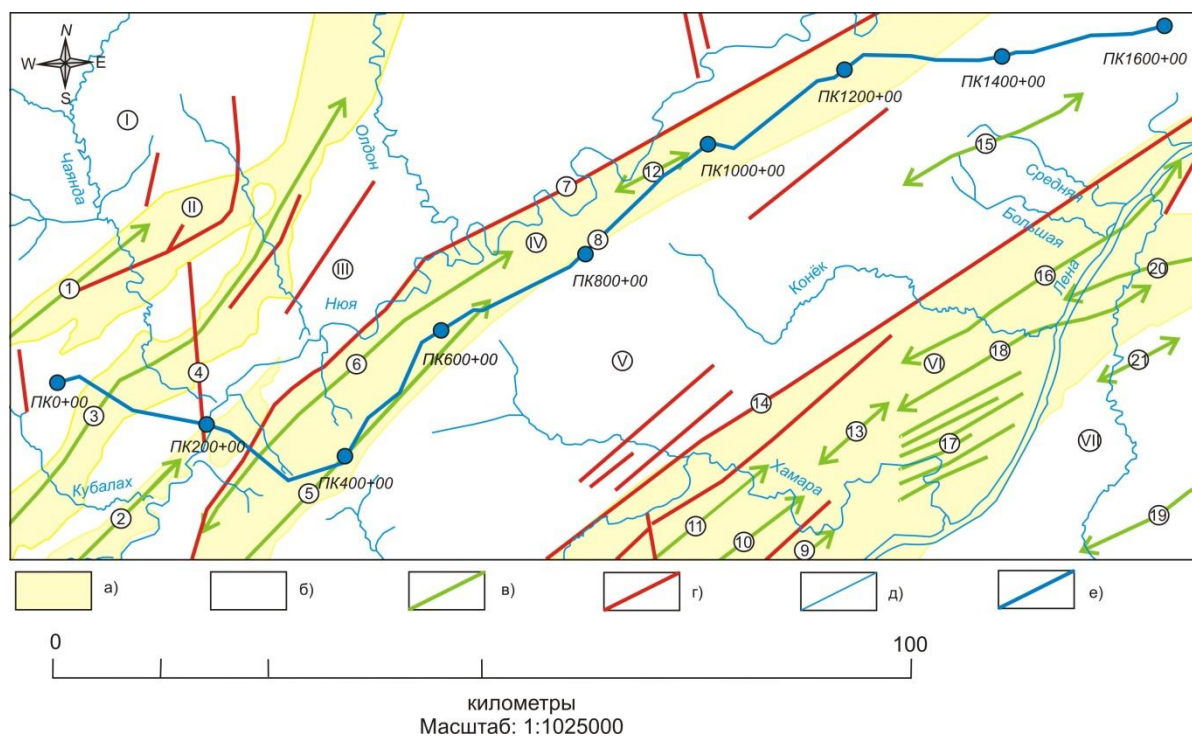


Рис. 2. Обзорная схема основных тектонических зон (А.В. Ежкова, 2018): а) антиклинальные зоны; б) синклиналичные зоны; в) оси складок; г) разломы; д) гидросеть; е) трасса газопровода. I – Верхнечаяндинская зона пологих дислокаций; II – Пеледуй-Олдонская антиклинальная зона; III – Нюйская синклиналичная зона; IV – Средненюйская антиклинальная зона; V – Нюйско-Хамаринская синклиналичная зона; VI – Мухтуйская антиклинальная зона; VII – Витимо-Джербинская синклиналичная зона. 1 – Кубалахская антиклиналь; 2 – Чаяндинская антиклиналь; 3 – Сюльдзюкярская антиклиналь; 4 – Чаяндинский сброс; 5 – Ульяновская антиклиналь; 6 – Тас-Уряхская антиклиналь; 7 – Нюйский взброс; 8 – Южно-Нюйский разлом; 9 – Хамаринская антиклиналь; 10 – Тарын-Юряхская антиклиналь; 11 – Иниэхская антиклиналь; 12 – Нюйская антиклиналь; 13 – Доргоннохская антиклиналь; 14 – Хамаринский разлом; 15 – Нюйская синклиналь; 16 – Терешкинская антиклиналь; 17 – Хамаринские линейные складки; 18 – Коньковская антиклиналь; 19 – Витимо-Джербинская синклиналь; 20 – Южно-Мухтуйская антиклиналь; 21 – Халамандинская антиклиналь

Fig. 2. Overview of the main tectonic zones (A.V. Ezhkova, 2018): а) anticlines; б) synclines; в) fold axes; г) faults; д) hydro grid; е) gas pipeline route. I – Verkhnechayandinskaya area of shallow dislocations; II – Peleduy-Oldonskaya anticlinal zone; III – Nyuyskaya synclinal area; IV – Srednenyuyskaya anticlinal zone; V – Nyuysko-Khamarinskaya synclinal area; VI – Mukhtuyskaya anticlinal zone; VII – Vitimo-Dzherbinskaya synclinal area. 1 – Kubalakhskaya anticline; 2 – Chayandinskaya anticline; 3 – Syuldzhyukyarskaya anticline; 4 – Chayandinskiy fault; 5 – Ulyanovskaya anticline; 6 – Tas-Uryakhskaya anticline; 7 – Nyuyskiy uplift; 8 – Yuzhno-Nyuyskiy fault; 9 – Khamarinskaya anticline; 10 – Taryn-Yuryakhskaya anticline; 11 – Iniyekhskaya anticline; 12 – Nyuyskaya anticline; 13 – Dorgonnokhskaaya anticline; 14 – Khamarinskiy fault; 15 – Nyuyskaya synclinal fold; 16 – Tereshkinskaya anticline; 17 – Khamrinskies linear folds; 18 – Konkovskaya anticline; 19 – Vitimo-Dzherbinskaya synclinal fold; 20 – Yuzhno-Mukhtuyskaya anticline; 21 – Khamamandinskaya anticline

Общим признаком антиклинальных структур Пеледуи-Олдонской зоны является их большая протяженность при незначительной амплитуде поднятия. На двух участках трасса газопровода расположена в пределах Нюйской синклинальной зоны, которая является одной из крупных структур Нюйско-Джербинской впадины. Отложения среднего-верхнего кембрия и нижнего ордовика в центральной части структуры залегают практически горизонтально. Углы наклона слоев не превышают 20° . В пределах Нюйской синклинальной зоны трасса газопровода пересекает Чаяндинский сброс. Большая часть трассы газопровода расположена в пределах Средненюйской антиклинальной зоны. Средненюйская антиклинальная зона шириной 20–30 км занимает водораздельное пространство между Пеледуем и Нюей, Хамрой и Нюей и представляет собою полосу валообразных, иногда гребневидных, ундулирующих и кулисообразно расположенных антиклинальных складок, сопряженных с такими же или более широкими и пологими синклиналями. Учитывая широкое распространение разрывных и иных нарушений на изучаемой территории, можно сделать вывод о том, что структурно-тектонические условия исследуемой территории способствуют развитию карста.

Инженерно-геологические особенности территории в значительной мере определяются коренными породами как непосредственно, так и через состав и свойства продуктов их выветривания. В пределах полосы газопровода распространены осадочные формации, среди которых выделяются: 1) карбонатная нижнекембрийская и среднекембрийская; 2) терригенно-карбонатная средне-верхнекембрийская, нижнеордовикская и средне-верхнеордовикская; 3) терригенная нижнеюрская. В целом геологическое строение территории благоприятно для развития карстового процесса, учитывая широкое распространение карбонатных пород, наличие трещин. В областях развития карбонатных пород нижнепалеозойского возраста распространены карстовые формы. Развитию карста может способствовать глубокое расчленение территории и трещиноватость пород. По трещинам происходит активная циркуляция подземных вод, и как следствие – растворение и вынос относительно легко растворимых минералов. Карст на поверхности проявляется в виде воронок, полостей, понор и карстовых рвов.

Непосредственно в пределах полосы отвода магистрального газопровода «Сила Сибири» участок «Чаянда–Ленск» был зафиксирован ряд карстопроявлений. Наиболее распространены локальные понижения земной поверхности – блюдца. Глубина данных понижений варьируется в пределах 0,5–3,32 м, диаметр составляет 23–63 м. Карстующиеся породы представлены преимущественно доломитами, встречаются известняки. Заполняющие породы выполнены сульфидными, супесями, щебнем. Пораженность территории составляет менее 5 %, процесс карстообразования относится к умеренно опасным. В то же время данная характеристика не отражает реальную опасность процесса на отдельных участках трассы трубопровода.

Согласно действующим нормативным документам при производстве изысканий в карстовых районах в труднорастворимых карбонатных породах основное внимание должно быть направлено на выявление уже сформировавшихся карстовых форм (их положения и параметров), поскольку время, необходимое для образования новых значительных по размеру карстовых пустот, несоизмеримо, как правило, со сроком службы инженерных сооружений. Зафиксированные непосредственно в полосе отвода поверхностные проявления карста – блюдца, представляют наименьшую опасность для трубопровода ввиду значительного удаления от оси трассы и отсутствия сложностей их идентификации на этапе изысканий. Наибольшую опасность представляют подземные формы, в том числе не в полной мере реализованные, идентификация и определение параметров которых зачастую представляют значительные сложности.

Исходные данные и методы исследования

В качестве исходных данных для проведения исследования использовались материалы комплексных инженерных изысканий территории, проведенных ООО «Ингеоком», ООО «Промнефтегазпроект», ФГУП «ВостСибАГП» по объекту «Магистральный газопровод "Сила Сибири"», участок «Чаянда–Ленск». Фактический материал по скважинам составил 763 скважины, были проанализированы данные по 85 инженерно-геологическим элементам. В ходе проведения комплексных инженерных изысканий при проходке скважин были зафиксированы провалы бурового инструмента, связанные, предположительно, с наличием пустот и разуплотненных зон в массиве карстующихся пород по трассе газопровода. В связи с большим расстоянием между скважинами (200–300 м) в работе использованы результаты электроразведки БЭЗ для определения зоны предполагаемого карстового образования. В результате анализа было предварительно выделено 23 участка, характеризующихся неоднородностью массива карстующихся пород по геолого-геофизическим данным. Таким образом, в качестве показателя закарстованности была выбрана неоднородность массива карстующихся пород (известняков и доломитов), которая может быть выражена через соответствующий коэффициент – «*коэффициент неоднородности массива карстующихся пород*». Вся трасса трубопровода протяженностью 160 км была условно разделена на равные отрезки по 500 м. На каждом отрезке рассчитывался коэффициент, равный отношению протяженности зоны предполагаемого развития карстового процесса к длине отрезка. Первоначальный объем выборки составил 320 позиций (отрезков). При дальнейшем анализе было выделено 59 отрезков, обладающих наибольшей информативностью (исключены участки размещения трассы в зоне юрских некарстующихся отложений, а также участки, характеризующиеся однородностью массива по геофизическим данным и данным бурения). Вся выборка была разделена на подвыборки по геоморфологическому признаку.

Для выделения зон повышенной трещиноватости по данным дистанционного зондирования в дальнейшем проведен линеamentный анализ. Главным условием возможности его использования является отражение геологических особенностей строения территории в рельефе. Геологические признаки линеamentов представляют собой выходы на земную поверхность разрывных нарушений. Среди геоморфологических индикаторов линеamentов на данной территории следует назвать линейно-вытянутые спрямленные денудационные уступы на склонах долин и водоразделов; прямолинейные бровки и вогнутые перегибы на склонах, ограничивающие участки с различной крутизной; центральные части седловин на водоразделах и др. Эти геоиндикационные признаки наиболее отчетливо проявлены на участках с увеличенной расчлененностью рельефа. Эрозионные формы рельефа проявляются в виде прямолинейных отрезков русел, тальвегов ложков и ложбин стока, тыловых швов и бортов речных долин; резких коленообразных изгибов временных и постоянных водотоков.

Для анализа линеamentов использовались мозаика трех сцен (рис. 3), полученных при помощи космического термоэмиссионного и отражающего радиометра ASTER, отраженных в GDEM (Global Digital Elevation Model). ЦМР в растровом формате представляет собой регулярную сетку абсолютных отметок рельефа, которая может быть визуализирована в оттенках серого цвета. Эта ЦМР выбрана потому, что имеет детальное пространственное разрешение (25 м) в сочетании с точностью по высоте и однородности исходного материала и минимальным количеством пустот.

Непосредственно для выделения линеamentов использовалась программа ГИС Geomatica (PCI Geomatics, Канада). Использование данного программного продукта выбрано в связи с его доступностью, широкими возможностями обработки векторных и растровых данных, представленных в более чем 100 различных форматах, простотой автоматизации процессов обработки информации.

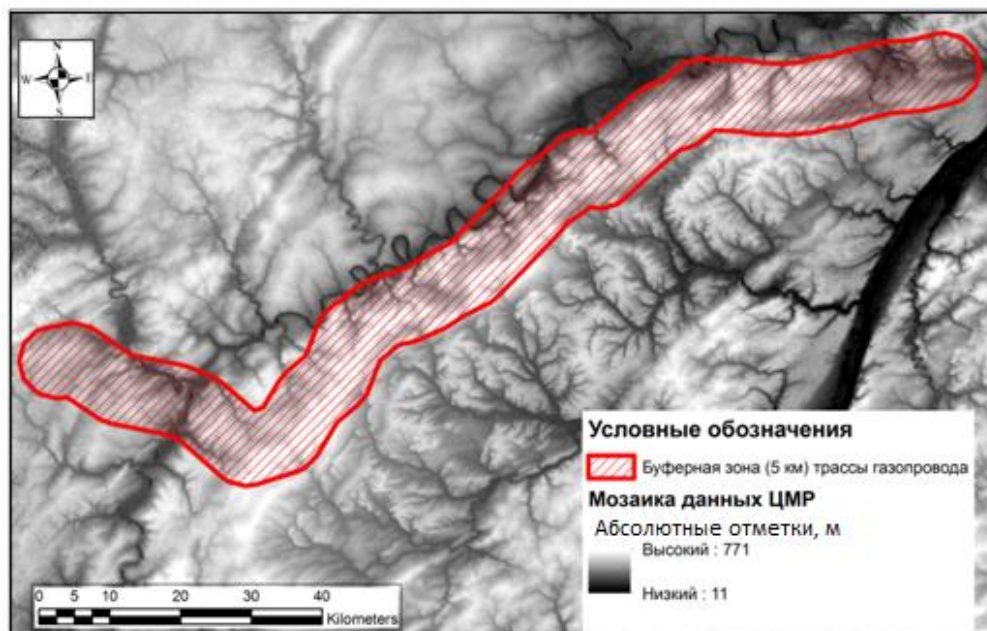


Рис. 3. Мозаика трех сцен «ASTER Gdem» 28

Fig. 3. Mosaic of three scenes «ASTER Gdem» 28

Для идентификации линеamentов в автоматизированном режиме использовался инструмент LINE: Lineament Extraction. Алгоритм работы модуля включает три основных этапа: идентификация границ, пороговая обработка, извлечение границ. На первом этапе при помощи алгоритма обнаружения границ Кэнни (Canny edge detector) выделялись линейно ориентированные элементы, представляющие собой цепь вытянутых в пространстве пикселей растра, близких по значениям абсолютных высот и резко выделяющихся среди окружающих. На втором этапе линейно ориентированные линии пикселей растра, выделяющиеся по абсолютным высотам среди окружающих, конвертировались в однобитный (черно-белый) растр (чер-

ный цвет – линеamentы, белый – остальные пиксели). На третьем этапе однобитный растр конвертируется в линейный векторный слой, отражающий линейно-ориентированные элементы (рис. 4).

Суммарные длины (в км) штрихов разных направлений образуют следующий ряд по мере уменьшения величины длины: 45°, 315°, 0°, 22°, 90°, 67°, 293°, 338°, т. е. наиболее распространена диагональная система штрихов.

Густота (плотность) расположения данных линейно-ориентированных элементов соответствует расчлененности ландшафта дневной поверхности на исследуемой территории. Картосхема линейной плотности линеamentов приведена на рис. 5.

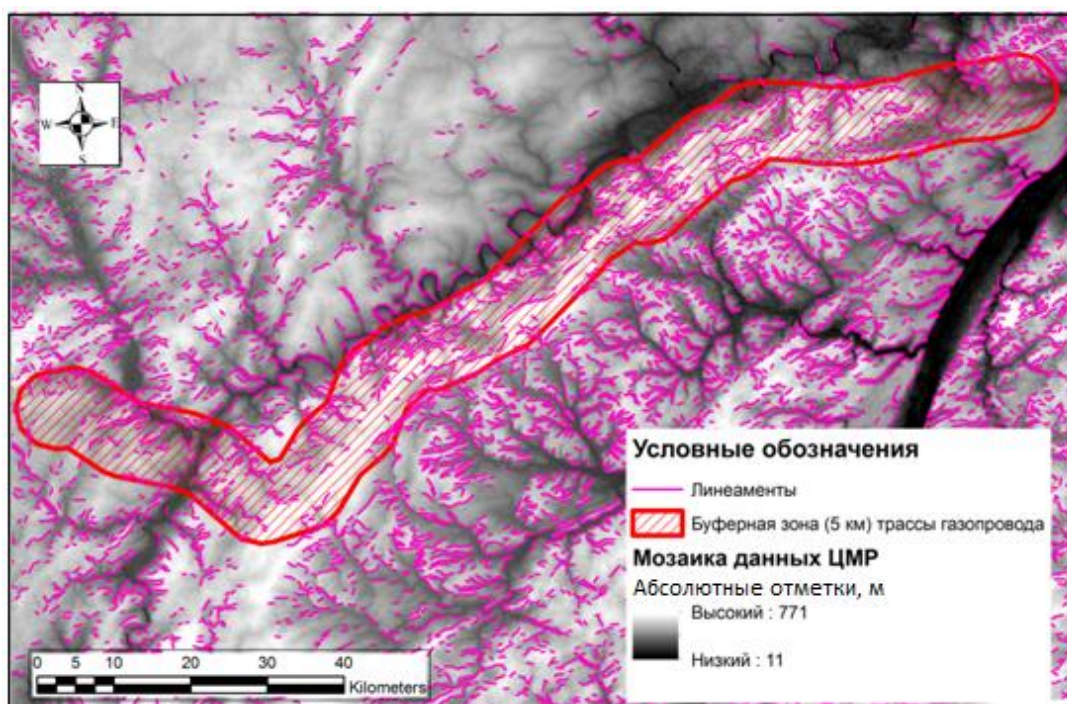


Рис. 4. Линеаменты, выделенные по ЦМР «ASTER Gdem V03»

Fig. 4. Lineaments selected by the DEM «ASTER Gdem V03»

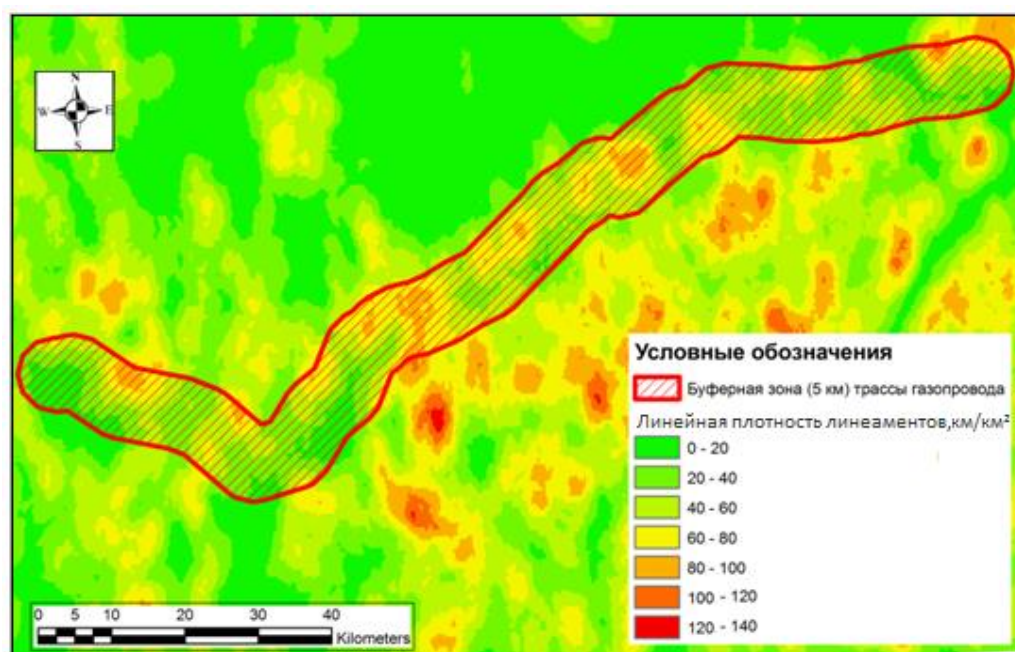


Рис. 5. Картосхема плотности линеаментов

Fig. 5. Map of lineaments density

Результаты

При наложении карты плотности линеаментов и тектонической схемы прослеживается, что локальные линейно-вытянутые области аномальной плотности линеаментов приурочены к зонам разломов северо-западного простирания. Необходимо отметить, что подавляющее большинство глубинных разломов, выделенных геолого-геофизическими методами, прояв-

ляются на космических снимках линеаментами, пространственно совпадая с их осевыми линиями или трассируясь параллельно им в непосредственной близости.

Наложение картосхемы плотности линеаментов и картосхемы потенциально опасных участков проявлений карста (рис. 6) показало связь между этими параметрами (таблица), о чем неоднократно указывалось и другими исследованиями [1, 4, 5, 21].

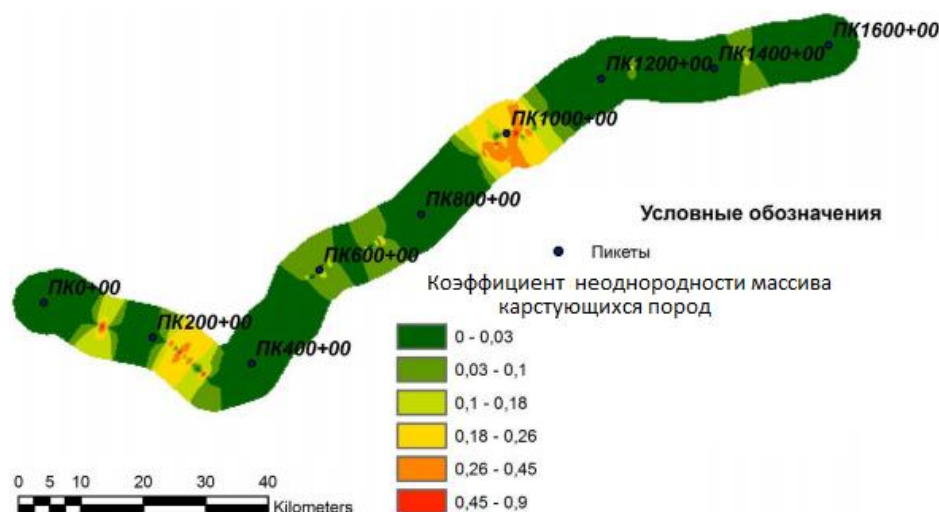


Рис. 6. Картограмма потенциально опасных участков проявлений карста

Fig. 6. Map of potentially dangerous areas of karst manifestations

Таблица. Коэффициенты корреляции между закарстованностью и линеаментами

Table. Correlation coefficients between the karst forms and lineaments

Наименование выборки Name of the sample	Коэффициенты корреляции между закарстованностью и линеаментами Correlation coefficients between the karst forms and lineaments	
	Линейная плотность линеamentов, км/км ² Linear density of lineaments, km/km ²	Удаленность от линеamentов, м Distance from lineaments, m
Весь участок/Entire section	0,726	–0,704
Надпойменная терраса Above-floodplain terrace	0,750	–0,689
Подножия склонов Foot of the slopes	0,902	–0,744
Поверхности выравнивания Alignment surfaces	0,537	–0,871

Согласно представленным результатам были получены достаточно высокие коэффициенты корреляции, что свидетельствует о взаимосвязи между развитием подземных карстопроявлений и наличием линеamentов. В результате проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что наиболее предрасположены к возможной активизации карстового процесса в целом по трассе газопровода участки, приуроченные к зонам повышенной трещиноватости массива.

Наши результаты показали неравнозначность выделения линеamentов в различных частях рельефа, например, для водоразделов и речных долин, поэтому этот вопрос требует проведения дальнейших исследований и подтверждения на других участках.

Заключение

Широкое распространение разрывных и иных нарушений на изучаемой территории позволяет сде-

лать вывод о том, что структурно-тектонические условия исследуемой территории способствуют развитию карста.

Анализ публикаций, обработка данных цифровой модели рельефа, полученных из открытых источников, позволили составить схему распространения линеamentов и схему плотности линеamentов, с указанием зон повышенной трещиноватости и, как следствие, более активным карстообразованием.

Полученные результаты наряду с другими факторами использовались для оценки карстовой опасности района трассы магистрального газопровода в южной Якутии.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Печеркин А.И., Болотов Г.Б., Катаев В.Н. Изучение тектонической трещиноватости платформенных структур для карстологических целей. Учебное пособие по спецкурсу. – Пермь: Пермский университет, 1984. – 85 с.
2. Катаев В.Н. Основы структурного картоведения. – Пермь: Пермский ун-т, 2004. – 109 с.
3. Чернов И.Ю., Нугманов И.И., Кадыров Р.И. Автоматизированный линеamentный анализ. – Казань: Казанский (При-волжский) федеральный университет, 2012. – 38 с.

4. Золотарев Д.Р., Катаев В.Н. Воздействие линеamentной тектоники на развитие карстовых процессов на локальном уровне // ГЕОРИСК. – 2013. – № 1. – С. 34–43.
5. Влияние геологического строения территории на распределение карстовых форм (на примере территории г. Кунгура) / В.Н. Катаев, С.В. Щербаков, Д.С. Золотарев, О.М. Лихая, Т.Г. Ковалева // Вестник Пермского университета. Научный журнал. Вып. 3 Геология. – 2009. – Вып. 4. – № 33. – С. 77–93.
6. Щербаков С.В., Катаев В.Н. Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2011. – Т. 153. – Кн. 1. – С. 203–224.

7. Ruiz-Fernández J., Oliva M., Hughes P. Permafrost and periglacial processes in mid- and low-latitude mountain regions // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2019. – V. 30. – № 4. – P. 245–248.
8. Computer vision-based framework for extracting tectonic lineaments from optical remote sensing data / E. Farahbakhsh, R. Chandra, H.K.H. Olierook, R. Scalzo, C. Clark, S.M. Reddy, R.D. Müller // *International Journal of Remote Sensing*. – 2020. – V. 41. – № 5. – P. 1760–1787. DOI: 10.1080/01431161.2019.1674462
9. Structural analysis and Miocene-to-Present tectonic evolution of a lithospheric-scale, transcurrent lineament: the Sciacca Fault (Sicilian Channel, Central Mediterranean Sea) / J. Fedorik, G. Toscani, E. Lodolo, D. Civile, L. Bonini, S. Seno // *Tectonophysics*. – 2018. – V. 722. – P. 342–355. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.014> (дата обращения 10.06.2020).
10. Tectonics of the Northeastern border of the Parana Basin (Southeastern Brazil) revealed by lineament domain analysis / M.R. Pinheiro, P. Cianfarra, F.N.J. Villela, F. Salvini // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2019. – V. 94. – № 102231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102231> (дата обращения 10.06.2020).
11. Prabhakaran A., Raj N.J. Mapping and analysis of tectonic lineaments of Pachamalai hills, Tamil Nadu, India using geospatial technology // *Geology, Ecology, and Landscapes*. – 2018. – V. 2. – № 2. – P. 81–103. DOI: 10.1080/24749508.2018.1452481
12. Fracture mapping of lineaments and recognizing their tectonic significance using SPOT-5 satellite data: a case study from the Bajestan area, Lut Block, east of Iran / R. Ahmadirohani, B. Rahimi, M.H. Karimpour, A.M. Shafaroudi, S.A. Najaf, A.B. Pour // *Journal of African Earth Sciences*. – 2017. – V. 134. – P. 600–612. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.07.027> (дата обращения 10.06.2020).
13. Das S., Pardeshi S.D. Comparative analysis of lineaments extracted from Cartosat, SRTM and ASTER DEM: a study based on four watersheds in Konkan region, India // *Spatial Information Research*. – 2018. – V. 26. – № 1. – P. 47–57. URL: <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0155-x> (дата обращения 10.06.2020).
14. Extraction of lineaments from different azimuth angles using geospatial techniques: a case study of Pravara basin, Maharashtra, India / S. Das, S.D. Pardeshi, P.P. Kulkarni et al. // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2018. – V. 11. – № 160. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3522-6> (дата обращения 10.06.2020).
15. Технический отчет. Выполнение комплексных инженерных изысканий по объекту «Магистральный газопровод «Сила Сибири». Участок Чаянда–Ленск. В 5 т. – Саратов: ОАО «ВНИПИГаздобыча», 2012. – Т. 2. – 2886 с.
16. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 59–68.
17. Строкова Л.А., Елифанова Е.А., Корженева 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.
18. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 33. – 6 p. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012046>
19. Strokova L.A. Recognition of geological processes in permafrost conditions // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – № 8. – P. 5517–5530. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4> (дата обращения 10.06.2020).
20. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 41–55.
21. Кац Я.Г., Полетаева А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линеаментной тектоники. – М.: Недра, 1986. – 140 с.

Поступила 29.06.2020 г.

Информация об авторах

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

Ежкова А.В., инженер, ООО «Газпром Инвест».

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

UDK 624.131

APPLICATION OF LINEAMENT ANALYSIS TO ASSESS THE KARST HAZARD IN THE DESIGN OF THE MAIN GAS PIPELINE IN SOUTH YAKUTIA

Lyudmila A. Strokovaya¹,
sla@tpu.ru

Alena V. Ezhkova²,
alyona7@inbox.ru

Anna V. Leonova¹,
avleonova@tpu.ru

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

² Gazprom Invest,
39, Lenin avenue, Tomsk, 634034, Russia.

Relevance of the work is caused by construction of the main gas pipeline in southern Yakutia. The area is characterized by complex natural and climatic conditions, poor geological engineering study, and extensive development of karst rocks. Taking into consideration the insufficiency of karst observation data, lineament analysis of satellite images has great importance for studying rock fracture zones. A lineament on a satellite image is a linear-banded image texture that reflects the features of the geological structure on the ground, such as zones of discontinuities, cracks and rock crushing, which are associated with the maximum permeability of the earth's crust for heat and mass transfer and migration of gas and liquid solutions. The latter circumstance opens the way to assess and forecast not only the prospects of the territory for the presence of natural resource, but also the danger of the development of exogenous geological processes, such as linear erosion, karst, landslides. The physical nature of the relationship between lineaments and karst manifestations allows us to use lineament analysis in assessing the conditions of construction of structures on karst territories.

The main aim of the study is to understand the spatial distribution of lineaments, their orientation, density, as a factor affecting the development of the karst process.

Methods. The main focus of the study is on extraction of lineaments within the route of the main gas pipeline, using a digital terrain model. The lineaments were extracted and analyzed in the Geomatica and ArcGIS programs, respectively.

Results. The use of modern technologies for selecting lineaments on satellite images opens up new opportunities for studying the geological structure of the territory. Maps of distribution of lineaments and their density in the studied area are made. Information on the structural and tectonic conditions of the territory and the obtained results of lineament analysis were used to assess the karst hazard of the route area.

Key words:

Main gas pipelines, risk assessment, lineament, geoinformation systems, karst

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

REFERENCES

1. Pecherkin A.I., Bolotov G.B., Kataev V.N. *Izucheniye tektonicheskoy treshchinovatosti platformnykh struktur dlya karstologicheskikh tselyey* [Study of tectonic fracturing of platform structures for karstological purposes]. Perm, Perm University Publ., 1984. 85 p.
2. Kataev V.N. *Osnovy strukturnogo kartovedeniya* [Fundamentals of structural karst studies]. Perm, Perm University Publ., 2004. 109 p.
3. Chernov I.Yu., Nugmanov I.I., Kadyrov R.I. *Avtomatizirovanny lineamentnyy analiz* [Automated lineament analysis]. Kazan, Kazan Federal University Publ., 2012. 38 p.
4. Zolotarev D.R., Kataev V.N. Lineament tectonic influence on development of karst processes at the local level. *Georisk*, 2013, no. 1, pp. 34–43. In Rus.
5. Kataev V.N., Shherbakov S.V., Zolotarev D.S., Lihaja O.M., Kovaleva T.G. Influence of the geological structure of the territory on the distribution of karst forms (on the example of the territory of Kungur). *Bulletin of Perm University. Geology*, 2009, vol. 4, no. 33, pp. 77–93. In Rus.
6. Shherbakov S.V. Kataev V.N. Integral estimation of karst hazard of urbanized territories (on the example of Kungur). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2011, vol. 153, no. 1, pp. 203–224. In Rus.
7. Ruiz-Fernández J., Oliva M., Hughes P. Permafrost and periglacial processes in mid- and low-latitude mountain regions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2019, vol. 30, no. 4, pp. 245–248.
8. Farahbakhsh E., Chandra R., Olierook H.K.H., Scalzo R., Clark C., Reddy S.M., Müller R.D. Computer vision-based framework for extracting tectonic lineaments from optical remote sensing data, *International Journal of Remote Sensing*, 2020, vol. 41, no. 5, pp. 1760–1787. DOI: 10.1080/01431161.2019.1674462
9. Fedorik J., Toscani G., Lodolo E., Civile D., Bonini L., Seno S. Structural analysis and Miocene-to-Present tectonic evolution of a lithospheric-scale, transcurrent lineament: the Sciacca Fault (Sicilian Channel, Central Mediterranean Sea). *Tectonophysics*, 2018, vol. 722, pp. 342–355. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.014> (accessed 10 June 2020).
10. Pinheiro M.R., Cianfarra P., Villela F.N.J., Salvini F. Tectonics of the Northeastern border of the Parana Basin (Southeastern Brazil) revealed by lineament domain analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, 2019, vol. 94, 102231. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102231> (accessed 10 June 2020).
11. Prabhakaran A., Raj N.J. Mapping and analysis of tectonic lineaments of Pachamalai hills, Tamil Nadu, India using geospatial technology. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 81–103. DOI: 10.1080/24749508.2018.1452481
12. Ahmadirohani R., Rahimi B., Karimpour M.H., Shafaroudi A.M., Najaf S.A., Pour A.B. Fracture mapping of lineaments and recognizing their tectonic significance using SPOT-5 satellite data: a case study from the Bajestan area, Lut Block, east of Iran. *Journal of African Earth Sci-*

- ences, 2017, vol. 134, pp. 600–612. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.07.027> (accessed 10 June 2020).
13. Das S., Pardeshi S.D. Comparative analysis of lineaments extracted from Cartosat, SRTM and ASTER DEM: a study based on four watersheds in Konkan region, India. *Spatial Information Research*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 47–57. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0155-x> (accessed 10 June 2020).
14. Das S., Pardeshi S.D., Kulkarni P.P. Extraction of lineaments from different azimuth angles using geospatial techniques: a case study of Pravara basin, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11, no. 160. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3522-6> (accessed 10 June 2020).
15. *Tekhnicheskiiy otchet. Vypolnenie kompleksnykh inzhenernykh izyskaniy po obektu «Magistralny gazoprovod "Sila Sibiri"». Uchastok Chayanda–Lensk* [Technical report. Performing complex engineering surveys for the Power of Siberia gas Main pipeline project. Chayanda–Lensk Section]. Saratov, OAO «VNIPI-gazdobycha», 2012. Vol. 2, 2886 p.
16. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 59–68. In Rus.
17. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.
18. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 33, 012046. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012046>
19. Strokova L.A., Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 8, pp. 5517–5530. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4> (accessed 10 June 2020).
20. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoye oil and gas field – Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.
21. Katz Ya.G., Poletaeva A.I., Rumyantseva E.F. *Osnovy lineamentnoy tektoniki* [Fundamentals of lineament tectonics]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 140 p.

Received: 29 June 2020.

Information about the authors

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

Alena V. Ezhkova, engineer, Gazprom Invest.

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

УДК 622.276.43:678.745.842

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ ЗАКАЧКЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ СШИТЫХ ГЕЛЕЙ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ КЕРНА

Галкин Сергей Владиславович¹,
doc_galkin@mail.ru

Кетова Юлия Анатольевна¹,
ketova.pstu@gmail.com

Савицкий Ян Владимирович¹,
yanpgu@gmail.com

Канг Ванли²,
kangwanli@126.com

Бауыржан Сарсенбекулы²,
sarsen_20-20@mail.ru

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

² Китайский нефтяной университет (Восточный Китай),
Китай, 266580, Шаньдун, Циндао, Янцзы Вест Роуд, 66.

Актуальность. Для большинства месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции характерно преобладание высокообводненного фонда скважин, что определяет высокую востребованность в эффективных технологиях снижения обводненности продукции скважин. Для этих целей за рубежом широко применяется технология предварительно сформированных гелей (preformed particle gel – PPG). Вместе с тем для внедрения технологии PPG на отечественных месторождениях необходимо учесть их геолого-технологические условия эксплуатации. Данная задача решена для условий низкотемпературных пластов при высокой минерализации пластовой воды. В публикации представлены результаты тестирования разработанного полимера PPG и стандартного полимерного заводнения на терригенном керне.

Цель: оценить возможность закачки предварительно сшитых полимерных частиц в терригенный керн, провести сравнительный анализ влияния суспензии полимерных частиц на поровое пространство керна с традиционным полимерным заводнением.

Объект: терригенные керны Пермских месторождений, раствор водорастворимого полимера, суспензия частиц полимерного геля.

Методика. Фильтрационные испытания проводились на установке для исследования керна при пластовых условиях. Методом рентгеновской томографии керна установлен механизм воздействия суспензии частиц полимерного геля на пласт. Проведен сравнительный анализ результатов охвата воздействием на поры различных размеров для технологии PPG и полимерного заводнения.

Результаты. Авторами получены частицы полимерного геля (технология PPG), которые при закачке в виде суспензии через нагнетательную скважину способны кольматировать наиболее проницаемые интервалы. Состав полимера адаптирован к условиям низкотемпературных пластов при высокой минерализации пластовой воды. Приведены результаты испытания разработанного полимера на керновых моделях. При исследованиях привлечены данные метода рентгеновской томографии керна. Результаты томографических исследований позволили визуализировать и количественно рассчитать заполнение суспензией емкостного пространства породы с учетом размеров отдельных пор. Установлено, что разработанный полимер эффективно заполняет высокопроницаемые интервалы, перераспределяет потоки водной фазы в низкопроницаемые интервалы, значительно увеличивая охват порового пространства дисперсионной средой в сравнении с традиционным полимерным заводнением.

Ключевые слова:

Полимер, полиакриламид, выравнивание профилей приемистости пласта, рентгеновская томография керна, частицы предварительно сшитого геля, обводненность.

Введение

Для большинства месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (НГП) характерно преобладание высокообводненного фонда скважин, что обусловлено длительной историей добычи данного нефтегазоносного района. Это определяет высокую востребованность для месторождений комплексных технологий, направленных на снижение

обводненности продукции скважин и вовлечение в разработку ранее недренируемых запасов [1]. Для снижения объемов добычи попутной воды применяют два основных подхода: ликвидация водопритоков в добывающей скважине и воздействие на профиль приемистости пласта через нагнетательную скважину. Практический опыт показывает, что при обводненности продукции скважины более 50 % методы устранения водопритоков через мероприятия, реализуемые

в добывающих скважинах, не всегда эффективны. Основной причиной этого является наличие множества зон водопитока, которые не могут быть устранены единичной обработкой [2]. Таким образом, для высокообводненных скважин востребованы технологии выравнивания профилей приемистости пласта, которые, в том числе, повышают коэффициент нефтеизвлечения.

Наиболее часто на отечественных месторождениях для выравнивания профилей приемистости пласта применяются технологии на основе полиакриламида (ПАА). Основными модификациями являются: частично гидролизированный ПАА; гидрофобно-модифицированный ПАА, который благодаря межмолекулярному взаимодействию способен образовывать вязкие растворы, сохраняющие реологические характеристики при высокой скорости сдвига [3, 4]. Однако закачка растворов ПАА имеет ряд недостатков. В частности, реологические свойства растворов ПАА в значительной степени зависят от минерализации воды, на основе которой готовится состав для закачки. При большой скорости закачки и при прокачке насосными агрегатами полимерные цепи рвутся, что ведет к снижению вязкости раствора [5–7]. Кроме того, закачка раствора полимера требует стационарного дорогостоящего оборудования, что сказывается на себестоимости технологии.

В последние два десятилетия в мировой практике эффективно применяется технология закачки в нагнетательные скважины суспензии частиц предварительно сшитого геля (ЧПГ) на основе акриламида. Такой реагент, приготовленный на основе пластовой воды и ЧПГ, закачивается в нагнетательную скважину, при этом набухшие эластичные частицы полимера проникают в высокопроницаемые интервалы и блокируют их. При фильтрации полимерного геля по наиболее проницаемым пропласткам частицы накапливаются в обводненных интервалах, образуя полимерную «пробку». Это позволяет снизить обводненность добываемой продукции скважин и дает возможность более длительное время эксплуатировать обводнившийся фонд, увеличивая конечную долю нефтеизвлечения. Практический опыт и теоретические аспекты применения данного метода широко освещены в иностранной литературе, где технологию принято обозначать как PPG (preformed particle gel) [8–10].

На месторождениях Китая, центральной и северной Америки по технологии PPG для снижения обводненности коллекторов с проницаемостью более $500 \cdot 10^{-3}$ мкм² успешно проведено свыше 4000 скважинных операций. Необходимо отметить, что технология PPG является более экологичной в сравнении с полимерным воздействием на пласт, где для сшивки используются поливалентные металлы, например хром. Исследования в области деструкции полиакриламида показали, что наиболее токсичный в его составе мономер акриламида, находясь в почве или в пластовой воде, полностью разрушается в период от 5 дней до 2 недель. В целом полимер типа PPG является экологически безопасным; находясь в аэробных условиях, подвергается микробиологической де-

струкции и разрушается примерно в течение одного года [11].

На отечественных месторождениях Западной Сибири имеется некоторый ограниченный опыт применения схожих с PPG технологий в условиях высокотемпературных пластов (60°) с низкой минерализацией пластовой воды [12]. Однако месторождения Волго-Урала имеют иные геологические характеристики: низкие пластовые температуры (менее 30°) и повышенную минерализацию пластовой воды. В таких условиях, ввиду отсутствия необходимых гидролитических процессов в полиакриламиде, известные отечественные полимеры имеют низкую абсорбционную емкость, являются менее эластичными и трудно прокачиваются в пласт. С учетом этого авторами синтезирован и протестирован полимер, адаптированный к геологическим условиям залежей Пермского края. Синтез полимера PPG осуществлялся по технологическим стадиям, описанным в работе [13]. При этом использовались дополнительные сомомеры, обеспечивающие необходимые физико-химические характеристики полимера в условиях низкотемпературных пластов с минерализацией пластовой воды в диапазоне 200–230 г/см³.

Основные характеристики разработанного полимера PPG

Основой технологии PPG является закачка суспензии с частицами суперабсорбента, который способен впитывать воду. Предварительно сшитый гель представляет собой частицы с трехмерной структурой, в которой цепи ПАА сшиты между собой ковалентными полярными связями. В работе [14] приведены основные свойства частиц PPG: размер частиц в сухом виде от 10 мкм до нескольких мм; абсорбционная емкость 1–100 раз; устойчивость к солям пластовой воды; стабильность при 140 °С в течение года; контролируемая кинетика абсорбции воды; регулируемая прочность частиц. При набухании полимерные частицы увеличиваются в объеме и становятся эластичными, двигаясь по пласту, они могут сжиматься и рваться [15]. По мере удаления от призабойной зоны пласта (ПЗП) в связи со значительным снижением давления нагнетания скорость перемещения частиц по пласту будет снижаться. При этом частицы полимерного геля будут накапливаться в высокопроницаемом интервале и образовывать в удаленной зоне пласта (УЗП) полимерную «пробку». Применение технологии PPG позволяет увеличить время прохождения водного потока от нагнетательной до добывающей скважины, обеспечив равномерное распределение нагнетаемой воды по профилю пласта.

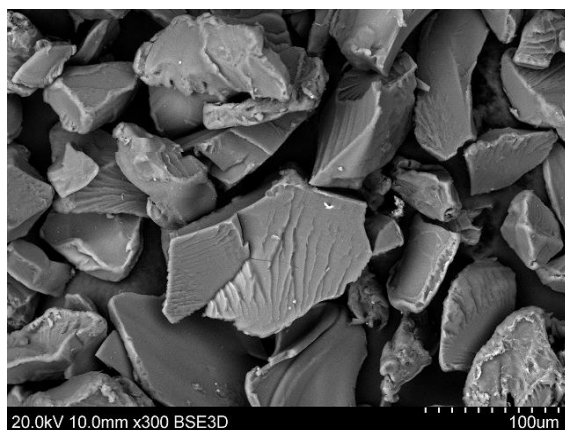
Полимер PPG получен авторами методом радикальной блок-полимеризации, при этом сшивка полимерных цепей проведена путем термической имидизации. Синтез проводился в растворе с высокой концентрацией мономеров. Условия проведения реакции позволяли получить полимерную массу с влажностью около 10–12 %. После синтеза полимерная масса механически делилась на небольшие части и отправлялась на сушку при температуре 80 °С до

твердого состояния. Далее проводилось механическое измельчение до необходимой фракции, которую получали путем классификации на ситах с нужным размером ячейки. Химический состав сшитого полимера запатентован [16].

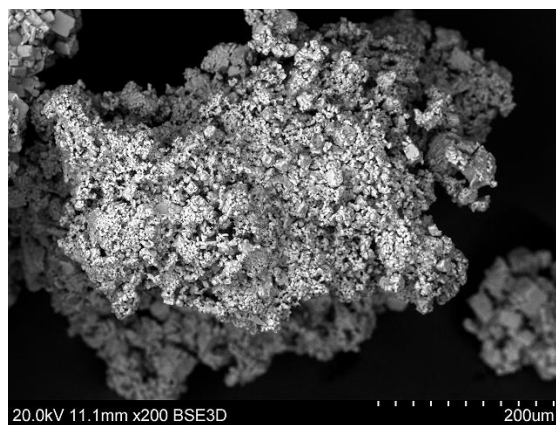
Абсорбционная емкость полученного порошка PPG с гранулометрическим составом от 250 до 500 мкм составляет 35–37 г/г, что достигалось через 45–60 мин после контакта с моделью пластовой воды (плотность – 1,145 г/см³). Размер набухших частиц составил 1716±387 мкм. На рис. 1, а представлено

изображение частиц PPG в сухом виде, на рис. 1, б – фото набухшей в 20 %-ом растворе хлористого натрия частицы, подверженной лиофильной сушке. Изображения получены на сканирующем электронном микроскопе разрешения 3–10 нм, модель «S-3400N» фирмы «HITACHI».

Указанная выше фракция полученного PPG ранее была протестирована на трещиноватом карбонатном керне. В эксперименте PPG продемонстрировали способность заполнять трещины с раскрытостью в 18–20 раз меньше диаметра набухших частиц [17].



а/а



б/б

Рис. 1. Фотографии с электронного сканирующего микроскопа частиц полимерного геля (фракция менее 250 мкм) в сухом виде (а) и после процесса абсорбции в соленой воде (20 % NaCl) и сушки под вакуумом (б)

Fig. 1. Polymer gel particles (fraction less than 250 microns) a) dry; b) after swelling in salt water (20 % sodium chloride solution)

Возможности изучения емкостного пространства горных пород методом рентгеновской томографии керна

Метод рентгеновской томографии позволяет создавать объемные модели из серии рентгеновских снимков – полутоновых изображений, в которых различным оттенкам серого соответствуют участки с разной плотностью. Главным достоинством метода является то, что он позволяет без разрушения образца визуализировать структуру его емкостного пространства. В отличие от других методов, рентгеновская томография позволяет визуальнo оценивать количество и направление трещин, распределение каверн и крупных пор. Особенно перспективными являются возможности применения томографии при экспериментах, направленных на изменение емкостного пространства пород при воздействии на керн различных составов. Эксперимент при этом разбивается на следующие этапы: томографирование сухого образца; фильтрационные испытания путем закачки реагента; повторное томографирование образца. На этапе фильтрационных испытаний необходимо в реагенты предварительно вводить рентгеноконтрастные растворы, которые, за счет большей рентгеновской плотности, лучше визуализируются на томограммах. К настоящему времени имеется некоторый опыт таких экспериментов [18–21], результатом которых обычно является визуальная оценка входа реагентов в керн без представления количественных оценок заполнения емкостного пространства.

Для определения возможности закачки PPG в керн необходимо решить следующие задачи: определить условия закачки полимера PPG и его прохождения через керн, количественно оценить охват заполнения порового пространства реагентом при технологии PPG и при традиционном полимерном заводнении. Наиболее часто рентгеновская томография применяется в коллекторах карбонатного состава, с визуализацией в них преимущественно крупных пор, каверн и трещин. Применение метода в терригенных породах осложняется тем, что малые размеры большинства пор не позволяют их достоверно визуализировать. Однако для однородных песчаников и алевропесчаников средние диаметры пор находятся в пределах разрешающей способности метода. С учетом этого исследования в данной работе выполнены на примере высокопроницаемых песчаников.

Изменения порового пространства образцов в результате закачки полимеров оценивались путем сопоставления томограмм до и после проведения фильтрационных экспериментов. С этой целью на первом этапе проведены лабораторные испытания по введению рентгеноконтрастной метки в полимер. На основании имеющегося опыта использования меток для томографии кернов [18, 19] изначально в качестве маркера использовали иодид натрия, который вводили в полимер при синтезе. Однако в данных экспериментах ионы йода в необходимой концентрации ингибировали процесс полимеризации. В результате цвет меченного полимера на томограммах незначи-

тельно отличался от порового пространства, что не позволило достоверно оценить проникновение в керн реагентов. Неудовлетворительные результаты также были получены при использовании в экспериментах в качестве рентгеноконтрастного состава сульфата бария и гидроксида бария.

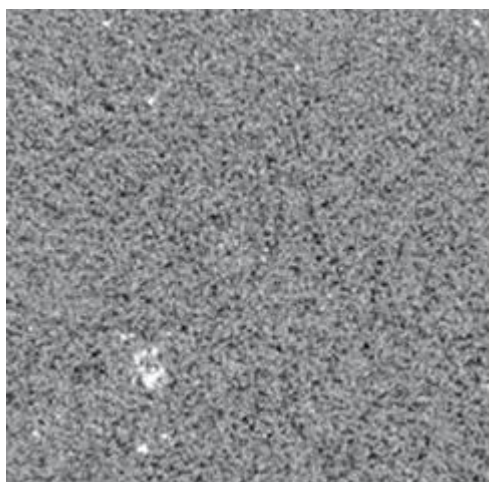
После неудачных попыток пометить полимер проведены эксперименты по введению рентгеноконтрастной метки непосредственно в саму дисперсионную среду, что дало положительный результат. Наилучший эффект получен при использовании в качестве модели пластовой воды раствора иодида натрия с концентрацией 38 % масс. (плотность 1,432 г/см³). Примененная в данном случае высокая концентрация ионов йода позволила на томограммах на участках входа меченного реагента получить визуальный сигнал светло-серого до почти белого оттенка, который четко отличается как от порового пространства (черный цвет), так и от минерального скелета породы (более темный оттенок серого).

Используемые в экспериментах два образца стандартного керна (диаметром 30 мм) взяты из близких по глубине интервалов одной скважины. Они предварительно экстрагированы и насыщены раствором хлористого натрия (модель пластовой воды) плотностью 1,198 г/мл. Газоволюметрическим методом определен коэффициент открытой пористости ($K_{п-газ}$), который в обоих случаях составил 17,6 %. Коэффициент проницаемости в сухих образцах (k_1) определялся путем закачки в них раствора хлорида натрия вязкостью 1,92 мПа·с; k_1 соответственно составил $583 \cdot 10^{-3}$ мкм² и $489 \cdot 10^{-3}$ мкм². Таким образом, оба образца представлены высокопроницаемыми коллекторами и имеют близкие фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), что позволяет использовать их для сравнения альтернативных технологий воздействия на пласт. Образец керна № 1 принят для тестирования технологии PPG, образец № 2 – для полимерного заводнения. Основные характеристики образцов приведены в табл. 1.

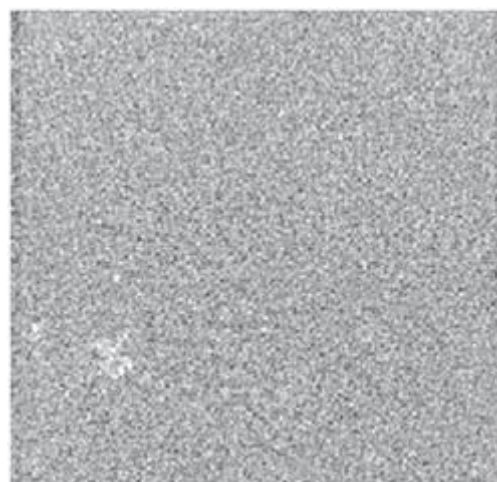
Количественная оценка методом рентгеновской томографии керна эффективности блокировки порового пространства при применении технологии PPG и полимерного заводнения

Методика эксперимента включала в себя следующие последовательные операции. На первом этапе проводили томографирование кернов. Использование в экспериментах системы компьютерной томографии Nikon Metrology XT H 225 позволило на стандартном керна достоверно визуализировать поры размером до 0,04 мм. Процесс визуализации 3D модели реализовывался с использованием программного обеспечения Avizo Fire. Результаты томографирования до закачки в керны реагентов представлены в виде 2D срезов на рис. 2, а (технология PPG) и рис. 3, а (полимерное заводнение). Поры в сухом состоянии образцов заполнены воздухом, ввиду чего визуализируются как наименее плотная среда черным цветом. Белым цветом визуализируются характеризующиеся наибольшей рентгеновской плотностью включения пирита. Сравнение томограмм в сухом состоянии (рис. 2, а; 3, а) показывает, что используемые в экспериментах образцы имеют сходную структуру минерального скелета и емкостного пространства, что подтверждается близкими значениями проницаемости и пористости ($K_{п-газ}$), определенные стандартным газоволюметрическим методом (табл. 1).

Высокое качество полученной цифровой 3D информации позволяет рассчитать видимые объемы емкостного пространства и определить по данным томографии пористость для сухого ($K_{п-1том}$) и насыщенного ($K_{п-2том}$) образцов керна. Результаты расчетов представлены в табл. 1. Для образцов в сухом состоянии при анализе 3D-моделей можно визуализировать только поры диаметром более 0,06 мм, поры меньших диаметров достоверно по томографии не выделяются. Ввиду этого пористость наиболее крупных пор, которые фиксируются по томографии, составила для сухих образцов порядка 43–45 % от полной $K_{п-газ}$: для образца № 1 $K_{п-1том}$ оценена в 7,6 %, для образца № 2 – 8,0 %.



а/а



б/б

Рис. 2. Томограммы образца керна № 1 при тестировании технологии PPG в сухом состоянии (а) и после закачки реагента (б)

Fig. 2. Tomograms of core sample no. 1 before (a) and after (b) PPG injection

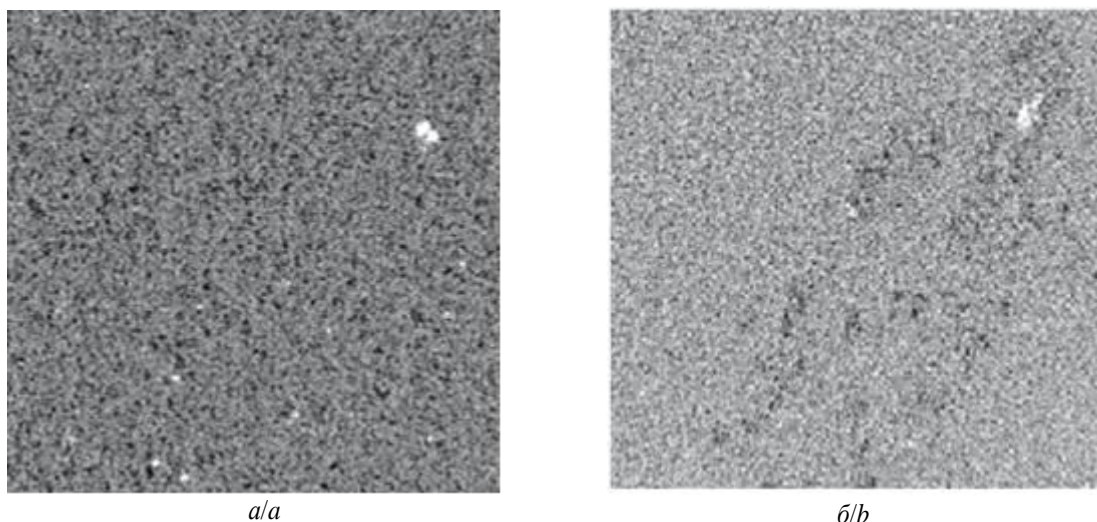


Рис. 3. Томограммы образца керна № 2 при тестировании технологии полимерного заводнения в сухом состоянии (а) и после закачки реагента (б)

Fig. 3. Tomograms of core sample no. 2 before (a) and after (b) polymer flooding

Таблица 1. Фильтрационно-емкостные характеристики образцов керна при тестировании технологии PPG и полимерного заводнения

Table 1. Core characteristics during experiments of PPG and polymer flooding

Номер образца/тип реагента Sample number/reagent type	В сухом состоянии Dry core			После закачки реагента After treatment	
	Коэффициент пористости по газу Gas porosity coefficient $K_{г-г\text{яз}}$, %	Коэффициент проницаемости Permeability coefficient k_1 , 10^{-3} мкм ²	Коэффициент пористости по томографии Tomography porosity coefficient $K_{г-г\text{том}}$, %	Коэффициент пористости по томографии Tomography porosity coefficient $K_{г-г\text{том}}$, %	Коэффициент проницаемости Permeability coefficient k_2 , 10^{-3} мкм ²
Образец № 1/ дисперсия PPG Sample no. 1/ PPG dispersion	17,6	583	7,60	0,64	16
Образец № 2/ полимерный раствор Sample no. 2/ polymer solution	17,6	489	8,02	4,26	24

На следующем этапе с соблюдением пластовых условий проводились фильтрационные испытания на установке для исследования керна УИК-5ВГ. На основе раствора иодида натрия с добавлением полиакриламида марки SNF AN132 в концентрации 5000 ppm были приготовлены два состава с вязкостью 9,9 мПа·с. В один из составов дополнительно вводился синтезированный порошок PPG фракционным составом менее 100 мкм в концентрации 1000 ppm. Таким образом были получены два меченных рентгено-

контрастных состава, которые тестировались в двух независимых фильтрационных экспериментах. После закачки двух поровых объемов реагентов образцы керна изымались, помещались в герметичную упаковку, где хранились в течение нескольких часов до начала повторных томографических исследований.

При сравнении томограмм до и после закачки важно анализировать одни и те же участки (объемы) керна. Это достигалось путем контроля на основе сопоставления реперов, которые в данном случае являются наиболее крупными включениями пирита, визуализируемыми на томограммах белым цветом. Сравнивая снятые в сухом и насыщенном состоянии томограммы, можно оценить для тестируемых составов степень охвата воздействием проницаемых интервалов.

Установлено, что характер заполнения емкостного пространства для технологии PPG и полимерного заводнения различен. Для технологии PPG объемы пор, которые отображались черным (рис. 2, а), стали окрашены светло-серым цветом (рис. 2, б). Заполнение пор рентгеноконтрастным составом произошло практически повсеместно. В эксперименте с полимерным заводнением поры заполнились менее равномерно. После закачки на томограммах прослеживаются участки черного цвета, в которых часть достаточно крупных пор осталась заполненной воздухом, а не реагентом (рис. 3, б). Эти выводы подтверждаются результатами расчетов по 3D-моделям.

Зная пористость до ($K_{п-1\text{том}}$) и после ($K_{п-2\text{том}}$) закачки реагента для визуализируемых по томографии размеров пор можно рассчитать коэффициент охвата пор воздействием реагента:

$$K_{\text{охв}} = (K_{п-1\text{том}} - K_{п-2\text{том}}) / K_{п-1\text{том}}$$

В среднем при тестировании технологии PPG меченой дисперсионной средой оказались не заполненными лишь 0,6 % ($K_{п-2\text{том}}$) из видимых по томографии 7,6 % пор ($K_{п-1\text{том}}$), что соответствует $K_{\text{охв}} = 91,6$ %. Для полимерного заводнения результаты охвата порового пространства воздействием заметно ниже:

$K_{п-1\text{том}}=8,0\%$; $K_{п-2\text{том}}=4,3\%$; $K_{\text{ошв}}=46,9\%$.

Еще более показательны результаты расчетов заполняемости емкостного пространства для различных диапазонов размеров пор, которые приведены в табл. 2. Для технологии PPG поры с диаметром более 0,08 мм во всех интервалах заполнены дисперсионной средой на 94 % и выше. Для пор диаметром от 0,07 до 0,08 мм $K_{\text{ошв}}$ составил 93,1 %; для минимального размера пор (0,06–0,07 мм) $K_{\text{ошв}}$ чуть ниже – 80,9 %. Результаты томографии показывают высокий охват порового пространства воздействием при закачке суспензии PPG для всех размеров видимых по томографии пор.

При тестировании полимерного заводнения относительно удовлетворительный охват – от 62 до 73 % – установлен только для самых крупных пор более 0,10 мм. Для пор диаметром от 0,09 до 0,10 мм $K_{\text{ошв}}=61,0\%$; от 0,08 до 0,09 мм – $K_{\text{ошв}}=52,4\%$. Для пор меньших диаметров $K_{\text{ошв}}$ начинает резко падать: $K_{\text{ошв}}=35,9\%$ в интервале от 0,07 до 0,08 мм; $K_{\text{ошв}}=12,2\%$ в интервале от 0,06 до 0,07 мм (табл. 2). Необходимо заметить, что размер более 0,06 мм характеризует достаточно крупные поры, т. е. эксперимент с полимерным заводнением в целом свидетельствует о неудовлетворительном охвате воздействием порового пространства керна.

Таблица 2. Распределение коэффициентов пористости по данным томографии до и после закачки реагентов и расчетного охвата воздействием дисперсионной средой для различных размеров диаметра пор

Table 2. Distribution of porosity coefficients according to tomography before and after reagents injection and the estimated coverage by the dispersion medium for various pore diameters

Диаметр пор, мм Pore diameter, mm	Технология PPG PPG technology			Полимерное заводнение Polymer flooding		
	$K_{п-1\text{том}}$	$K_{п-2\text{том}}$	$K_{\text{ошв}}$	$K_{п-1\text{том}}$	$K_{п-2\text{том}}$	$K_{\text{ошв}}$
	%					
0,06–0,07	2,6303	0,5024	80,9	1,6396	1,4394	12,2
0,07–0,08	0,7857	0,0545	93,1	1,9783	1,2688	35,9
0,08–0,09	1,2196	0,0453	96,3	0,6713	0,3195	52,4
0,09–0,10	1,0858	0,0176	98,4	1,0702	0,4171	61,0
0,10–0,11	0,6175	0,0059	99,0	0,9734	0,2967	69,5
0,11–0,12	0,3916	0,0032	99,2	0,5404	0,1715	68,3
0,12–0,13	0,3668	0,0029	99,2	0,4120	0,1306	68,3
0,13–0,14	0,1935	0,0016	99,2	0,2267	0,0650	71,3
0,14–0,15	0,1036	0,0012	98,8	0,1600	0,0450	71,9
0,15–0,16	0,0844	0,0011	98,7	0,1163	0,0328	71,8
0,16–0,17	0,0508	0,0005	99,0	0,0628	0,0239	61,9
0,17–0,18	0,0236	0,0005	97,9	0,0531	0,0180	66,1
0,18–0,19	0,0160	0,0002	98,8	0,0325	0,0112	65,5
0,19–0,20	0,0112	0,0006	94,6	0,0231	0,0069	70,1
0,20–0,21	0,0079	0,0002	97,5	0,0172	0,0051	70,3
0,21–0,22	0,0059	0,0004	93,2	0,0143	0,0042	70,6
0,22–0,23	0,0027	0,00015	94,4	0,0094	0,0026	72,3
0,23–0,24	0,0010	0,00005	95,0	0,0089	0,0026	70,8
0,24–0,25	0,0006	0,00000	100,0	0,0076	0,0021	72,4
Итого	7,60	0,64	91,6	8,02	4,26	46,9

Таким образом, в результате применения метода рентгеновской томографии керна установлено, что при одинаковых объемах закачки тестируемых реа-

гентов суспензия PPG создает большие фильтрационные сопротивления в сравнении с полимерным заводнением, за счет чего потоки дисперсионной среды, содержащие меченный компонент, перераспределяются в низкопроницаемые интервалы.

Анализ результатов фильтрационных экспериментов при применении технологии PPG и полимерного заводнения

Результаты фильтрационных испытаний закачки реагентов в виде графиков изменения проницаемости образцов и перепада давления от прокачки поровых объемов жидкости представлены на рис. 4. Ход прокачки полимеров можно разбить на три последовательных этапа. Первоначально раствор хлорида натрия вязкостью 1,92 мПа·с прокачивался через образец при поддержании объемного расхода 5 см³/мин до стабилизации перепада давления. На данном этапе определялась проницаемость образца до воздействия k_1 по формуле (1)

$$k_1 = \frac{q \cdot \mu \cdot l}{F \cdot \Delta P} \cdot \frac{1000}{60}, 10^{-15} \text{ м}^2, \quad (1)$$

где q – расход флюида, см³/мин; μ – вязкость жидкости, мПа·с; l – длина образца, см; F – площадь сечения образца, см²; ΔP – перепад давления, атм; $\frac{1000}{60}$ – коэффициент пересчета.

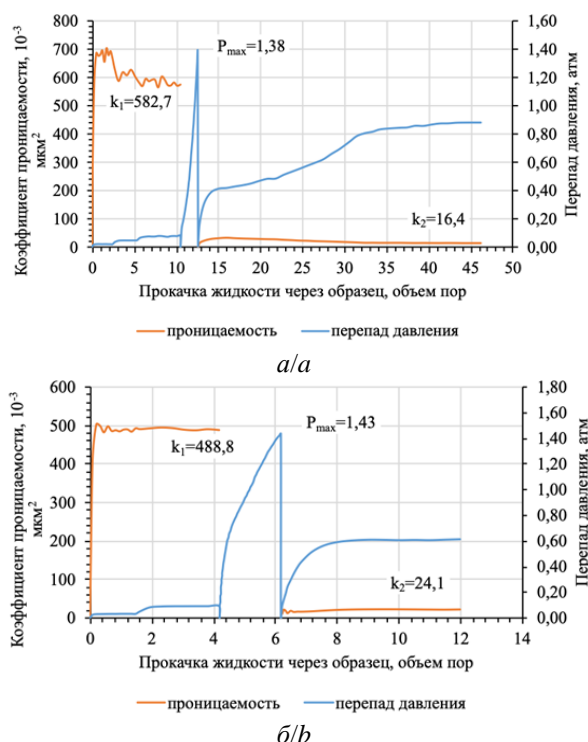


Рис. 4. Результаты фильтрационных испытаний технологии PPG (а) и полимерного заводнения (б)

Fig. 4. Results of core flooding tests of PPG technology (a) and polymer flooding (b)

На втором этапе из разделительной поршневой емкости проводилась закачка суспензий на основе

тестируемых реагентов при скоростях 1 см³/мин. Поршневая система при этом ввиду возможности осаждения со временем полимеров была ориентирована строго вертикально. В каждом из испытаний суммарно закачено по два поровых объема исследуемой жидкости. На рис. 4 данный этап характеризуется резким возрастанием ΔP с быстрым достижением максимума, который в проведенных экспериментах сопоставим (PPG – 1,38 атм; полимерное заводнение – 1,43 атм). После завершения закачки реагента керны вынимались из установки для промывки торцов от частиц полимера.

На заключительном этапе возобновлялась прокачка водного раствора хлорида натрия через образец при объемном расходе 5 см³/мин до стабилизации ΔP с повторным определением проницаемости модели пласта после воздействия полимером (k_2). В целом можно говорить о том, что проницаемость кернов после закачки реагентов в обоих случаях кратно снизилась. Причем после воздействия PPG для изначально более проницаемого керна ($583 \cdot 10^{-3}$ мкм² против $489 \cdot 10^{-3}$ мкм²) величина k_2 ниже, чем при полимерном заводнении ($16 \cdot 10^{-3}$ мкм² против $24 \cdot 10^{-3}$). Соответственно, остаточный фактор сопротивления F_{π} (k_2/k_1), характеризующий снижение проницаемости при испытаниях, для технологии PPG составил 0,027; для полимерного заводнения – 0,049. Это свидетельствует о том, что эффективность блокировки проницаемых интервалов при использовании полимера PPG в 1,5 раза выше.

По мере прокачки реагента PPG от 14 до 33 поровых объемов установлен постепенный линейный рост ΔP (рис. 4, а). В этот период частицы полимера перемещались по высокопроницаемым зонам, формируя в керне полимерный «экран». После завершения данного этапа давление закачки вышло на плато со значением $\Delta P=0,9$ атм, что можно интерпретировать как окончание формирования «экрана» и его равномерное перемещение по керну. В совокупности результаты данного эксперимента с учетом проницаемости керна, размера частиц и их концентрации свидетельствуют, что при переменной закачке реагента PPG и пластовой воды риск блокировки ПЗП должен быть минимален.

При тестировании полимерного заводнения на этапе измерения k_2 , наоборот, установлен резкий рост ΔP сразу после прокачки двух поровых объемов и выход на «плато» при значении 0,6 атм (рис. 4, б). Столь быстрое достижение максимального давления нагнетания свидетельствует о том, что вязкий раствор в данном случае практически беспрепятственно фильтровался через проницаемые пропластки. В этом случае большинство проницаемых каналов не блокируется, в них не создается необходимого полимерно-

го экрана, обеспечивающего фильтрационное сопротивление для перераспределения потоков в низкопроницаемые зоны. Таким образом, сравнительный анализ результатов фильтрационных испытаний показывает, что полимерное заводнение менее эффективно в сравнении с технологией PPG.

Заключение

В результате фильтрационных экспериментов на керновых моделях установлено, что разработанный полимер PPG эффективно снижает проницаемость. Коэффициент проницаемости керна для технологии PPG снизился в 36 раз с $583 \cdot 10^{-3}$ до $16 \cdot 10^{-3}$ мкм², тогда как для полимерного заводнения лишь в 20 раз – с $489 \cdot 10^{-3}$ до $24 \cdot 10^{-3}$ мкм². Анализ хода фильтрационных испытаний показывает, что реагент PPG формирует в проницаемых зонах полимерный «экран», который затем равномерно перемещается по керну, перераспределяя фильтрационные потоки в низкопроницаемые пропластки. Частицы PPG при закачке в пласт сохраняют свою подвижность, что свидетельствует о минимальном риске нежелательной блокировки ПЗП. При эксперименте со стандартным полимерным составом вязкий раствор быстро фильтровался через проницаемые пропластки, в необходимой степени, не блокируя их и не создавая полимерной «пробки».

Томографические исследования керна показали, что в эксперименте при закачке реагента PPG достигнут максимальный охват воздействием крупных пор (более 0,06 мм) меченной дисперсионной жидкостью (92 %), тогда как при закачке традиционного раствора полиакриламида он в 2 раза ниже (46 %). Применение метода рентгеновской томографии керна позволило количественно рассчитать степень охвата воздействием дисперсионной жидкостью емкостного пространства породы с учетом размеров отдельных пор.

Таким образом, в результате проведенных томографических и фильтрационных экспериментов на керновых моделях установлено, что частицы полимерного геля PPG эффективно блокируют проницаемые интервалы. Экспериментально подтверждено свойство реагента перераспределять потоки в низкопроницаемые менее доступные зоны пласта. Полимерный состав PPG рекомендован к проведению опытно-промышленных испытаний на промысловых объектах.

Статья подготовлена по материалам исследований, проводимых при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62120X0038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гумерова Г.Р., Яркиева Н.Р. Анализ эффективности применения вязкоупругого поверхностно-активного состава на месторождениях Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 19–25. DOI: 10.18799/24131830/2019/1/47
2. Liu Yu., Bai B., Wang Ye. Applied technologies and prospects of conformance control treatments in China // Oil & Gas Science and

- Technology – Rev. IFP Energies nouvelles. – 2010. – V. 65. – № 6. – P. 859–878. DOI: 10.2516/ogst/2009057
3. Нажису, Ерофеев В.И. Исследование и применение технологии полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 11 (часть 2). – С. 420–424. DOI: 10.17513/use.36963
4. Wever D.A.Z., Picchinoni F., Broekhuis A.A. Polymers for enhanced oil recovery: a paradigm for structure-property

- relationship in aqueous solution // Progress in polymer science. – 2011. – № 36. – P. 1558–1628. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2011.05.006
5. Полимерное заводнение для увеличения нефтеотдачи на месторождениях легкой и тяжелой нефти / А. Тома, Б. Саюк, Ж. Абилов, Е. Мазбаев // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2017. – № 7–8. – С. 58–67.
6. Review on polymer flooding: rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems / M.S. Kamal, A.S. Sultan, U.A. Al-Mudaiyeh, I.A. Hussein // Polymer Reviews. – 2015. – P. 1–40. DOI: 10.1080/15583724.2014.982821
7. Sheng J.J., Leonhardt B., Azri N. Status of polymer-flooding technology // J of Canadian Petroleum Technology. – 2015. – V. 54. – Iss. 02. – P. 116–126. DOI: 10.2118/174541-PA
8. Анализ эффективности применения заводнения нефтеносных пластов на основе водорастворимого полиакриламида и предварительно сшитых полиакриламидных частиц / Ю.А. Кетова, Б. Бай, А.Л. Казанцев, С.В. Галкин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 251–262. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.5
9. Zhu D., Bai B., Hou J. Polymer gel systems for water management in high-temperature petroleum reservoirs: a chemical review // Energy Fuels. – 2017. – № 31. – P. 13063–13087. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b02897
10. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control // Petroleum exploration and development. – 2015. – V. 42. – Iss. 4. – P. 525–532. DOI: 10.1016/S1876-3804(15)30045-8
11. Polyacrylamide degradation and its implications in environmental / B. Xiong, R.D. Loss, D. Shields, T. Pawlik, R. Hochreiter, A. Zydney, M. Kumar // Systems npj Clean Water. – 2018. – V. 1. – Iss. 17. – P. 1–9. DOI: 10.1038/s41545-018-0016-8
12. Каушанский Д.А. Многофункциональная инновационная технология повышения нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки «Темпоскрин-люкс» // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. – 2014. – Т. 1. – № 9. URL: http://oilgasjournal.ru/vol_9/kaush-adv.pdf (дата обращения: 19.04.2020).
13. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications / B. Bai, L. Li, Yu Liu, Zh. Wang, H. Liu // SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery. – Tulsa, Oklahoma, 17–21 April, 2004. DOI: 10.2118/89389-MS
14. Bai B., Wei M., Liu Yu. Field and lab experience with a successful preformed particle gel conformance control technology // SPE Production and Operations Symposium. – Oklahoma City, Oklahoma, USA: Society of Petroleum Engineers, 23–26 March, 2013. DOI: 10.2118/164511-MS
15. Preformed particle gel for conformance control: transport mechanism through porous media / B. Bai, Y. Liu, J.-P. Coste, L. Li // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2007. – V. 10. – № 02. DOI: 10.2118/89468-PA
16. Способ разработки нефтяного пласта: пат. РФ № 2729652. 2020. Бюл. № 23.
17. Тестирование технологии предварительно сшитых частиц полимерного геля для ограничения водопритоков на фильтрационных ядерных моделях / Ю.А. Кетова, Б. Бай, Г.П. Хижняк, Е.А. Гладких, С.В. Галкин // Записки горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 91–96. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.91
18. Galkin S.V., Kolychev I.J., Savitskiy Ya.V. Potentialities of investigation of reservoir hydrophobization by compilation of X-ray core tomography and lateral logging // Russian Geology and Geophysics. – 2019. – № 10. – P. 1496–1507.
19. Исследование смачиваемости коллекторов нефтяных месторождений методом рентгеновской томографии ядра / А.А. Ефимов, Я.В. Савицкий, С.В. Галкин, Е.В. Соболева, В.Ш. Гурбанов // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2016. – Т. 4. – № 4. – С. 55–63.
20. Geochemical controls on wettability alteration at pore-scale during low salinity water flooding in sandstone using X-ray micro computed tomography / Y. Chen, N.K. Jha, D. Al-Bayati, M. Lebedev, M. Sarmadivaleh, S. Iglaue, A. Saeedi, Q. Xie // Fuel. – 2020. – № 0271. – Статья № 117675. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117675
21. Two-phase flow visualization under reservoir conditions for highly heterogeneous conglomerate rock: A core-scale study for geologic carbon storage / K.-Y. Kim, J. Oh, W.S. Han, K.G. Park, Y.J. Shinn, E. Park // Scientific Reports. – 2018. – V. 8. – № 1. – DOI: 10.1038/s41598-018-23224-6

Поступила 22.10.2020 г.

Информация об авторах

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

Кетова Ю.А., научный сотрудник, младший научный сотрудник кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Савицкий Я.В., старший преподаватель кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Канг Ванли, доктор технических наук, профессор Китайского нефтяного университета.

Бауыржан Сарсенбекулы, PhD, приглашенный научный сотрудник Китайского нефтяного университета.

UDC 622.276.43:678.745.842

X-RAY ANALYSIS OF CONFORMANCE CONTROL TECHNOLOGY BASED ON PREFORMED PARTICLE GEL TREATMENT

Sergey V. Galkin¹,
doc_galkin@mail.ru

Yulia A. Ketova¹,
ketova.pstu@gmail.com

Yan V. Savitskiy¹,
yanpgu@gmail.com

Kang Wanli²,
kangwanli@126.com

Bauyrzhan Sarsenbekuly²,
sarsen_20-20@mail.ru

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

² School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China),
66, West Road Qingdao, Changjiang Shandong, 266580, China.

The relevance. Most fields of the Volga-Ural oil and gas province are characterized by high water cut of wells that determines the high demand of effective technologies for decreasing excess water production. For these purposes, preformed particle gel (PPG) technology is widely used abroad. However, for PPG application in domestic oil fields, it is necessary to take into account their geological and technological operating conditions. This problem is solved for conditions of low-temperature formations with high salinity of formation water. The publication presents the test results of the developed PPG polymer and standard polymer flooding on sandstone core.

The main aim is to evaluate the possibility of injection of PPG into a terrigenous core, to conduct a comparative analysis of PPG treatment with traditional polymer flooding.

Object: terrigenous cores of Perm deposits, a solution of a water-soluble polyacrylamide, PPG.

Method. Filtration tests were carried out on the filtration installation UIK-5VG. The X-ray tomography method was used to estimate the pore space changing after PPG treatment and compare it with traditional polymer flooding.

Results. The authors synthesized particles of a polymer gel (PPG technology) for reservoir conformance control. During application of PPG through the injection well the gel particles are able to move through the near well bore zone and block the high permeable reservoir zones, that leads to redistribution of water flows to the low-permeable zones. The composition of the polymer is adapted to the conditions of low-temperature formations with high salinity of formation water. The article presents the test results of the developed polymer on core models. The studies involved the data from the method of X-ray tomography of the core. The results of tomographic studies made it possible to visualize and quantitatively calculate the filling of the core pore space with a suspension, taking into account the size of individual pores. It was established that the developed polymer fills highly permeable intervals much more efficiently than standard polyacrylamide flooding.

Key words:

Polymer, polyacrylamide, reservoir profile conformance control, core X-ray tomography, preformed particle gel, water cut.

The article was prepared on the basis of the research conducted with financial support from the Russian Ministry of Education and Science within the framework of the Federal Target Program «Research and Development in Priority Directions for the Development of the Russian Science and Technology Complex for 2014–2020» (Unique project identifier RFMEFI62120X0038).

REFERENCES

- Gumerova G.R., Yarkeeva N. R. Analysis of the efficiency of applying viscous-elastic surface-active composition on the fields of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 19–25. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/1/47.
- Liu Yu., Bai B., Wang Ye. Applied technologies and prospects of conformance control treatments in China. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 2010, vol. 65, no. 6, pp. 859–878. DOI: 10.2516/ogst/2009057.
- Najisu, Erofeev V.I. Research and application of polymer flooding technology to enhance oil recovery. *Advances in Current Natural Science*, 2018, no. 11, pp. 420–424. In Rus. DOI: 10.17513/use.36963.
- Wever D.A.Z., Picchioni F., Broekhuis A.A. Polymers for enhanced oil recovery: a paradigm for structure–property relationship in aqueous solution. *Progress in Polymer Science*, 2011, vol. 36, pp. 1558–1628. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2011.05.006.
- Toma A., Sayuk B., Abirov J., Mazbayev E. Polymer flooding for increasing of oil recovery in light and heavy oil fields. *Territory «NEFTEGAZ»*, 2018, no. 7–8, pp. 58–67. In Rus.
- Kamal M.S., Sultan A.S., Al-Mudaiyeh U.A., Hussein I.A. Review on polymer flooding: rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems. *Polymer Reviews*, 2015, pp. 1–40. DOI: 10.1080/15583724.2014.982821.
- Sheng J.J., Leonhardt B., Azri N. Status of polymer-flooding technology. *J of Canadian Petroleum Technology*, 2015, vol. 54, no. 02, pp. 116–126. DOI: 10.2118/174541-PA.

8. Ketova Y.A., Bai B., Kazantsev A.L., Galkin S.V. Analysis of the efficiency of waterflooding of oil reservoirs using water-soluble polyacrylamide and preliminary cross-linked polyacrylamide particles. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 260–273. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.3.5.
9. Zhu D., Bai B., Hou J. Polymer gel systems for water management in high-temperature petroleum reservoirs: a chemical review. *Energy Fuels*, 2017, no. 31, pp. 13063–13087. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b02897.
10. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control. *Petroleum exploration and development*, 2015, vol. 42, no. 4, pp. 525–532. DOI: 4.10.1016/S1876-3804(15)30045-8.
11. Xiong B., Loss R.D., Shields D., Pawlik T., Hochreiter R., Zydney A., Kumar M. Polyacrylamide degradation and its implications in environmental. *Systems npj Clean Water*, 2018, vol. 1, no. 17, pp. 1–9. DOI: 10.1038/s41545-018-0016-8.
12. Kaushanskii D.A. Multifunctional innovation technology for enhanced oil recovery at a late stage of development of Temposkrinlux. *Georesursy. Geoenergetika. Geopolitika*, 2014, vol. 1, no. 9, In Rus. Available at: http://oilgasjournal.ru/vol_9/kaush-adv.pdf (accessed 19 April 2020).
13. Bai B., Li L., Liu Y., Wan Zh., Liu H. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications. *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*. Tulsa, Oklahoma, 17–21 April, 2004. DOI: 10.2118/89389-MS.
14. Bai B., Wei M., Liu Yu. Field and lab experience with a successful preformed particle gel conformance control technology. *SPE Production and Operations Symposium*. Oklahoma City, Oklahoma, USA, 23–26 March, 2013. DOI: 10.2118/164511-MS.
15. Bai B., Liu Y., Coste J.-P., Li L. Preformed particle gel for conformance control: transport mechanism through porous media. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2007, vol. 10, no. 02. DOI: 10.2118/89468-PA.
16. Susanov Ya.M., Ustkachintsev E.N., Rozhkova Yu.A. *Sposob razrabotki nefryanogo plasta* [Method of oil layer development]. Patent RF no. 2729652, 2020.
17. Ketova Y., Bai B., Khizhnyak G., Gladkikh E., Galkin S. Testing of preformed particles polymer gel technology on core filtration models to limit water inflows. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 91–96. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.91.
18. Galkin S.V., Kolychev I.J., Savitskiy Ya.V. Potentialities of investigation of reservoir hydrophobization by compilation of X-ray core tomography and lateral logging. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, no. 10, pp. 1496–1507.
19. Efimov A.A., Savitskiy Ya.V., Galkin S.V., Soboleva E.V., Gurbanov V.Sh. Study of wettability of reservoirs of oil fields by the method of x-ray tomography core. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 4, pp. 55–63. In Rus.
20. Chen Y., Jha N.K., Al-Bayati D., Lebedev M., Sarmadivaleh M., Iglaier S., Saeedi A., Xie Q. Geochemical controls on wettability alteration at pore-scale during low salinity water flooding in sandstone using X-ray micro computed tomography. *Fuel*, 2020, no. 271, article 117675. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117675.
21. Kim K.-Y., Oh J., Han W.S., Park K.G., Shinn Y.J., Park E. Two-phase flow visualization under reservoir conditions for highly heterogeneous conglomerate rock: a core-scale study for geologic carbon storage. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, article 4869. DOI: 10.1038/s41598-018-23224-6.

Received: 22 October 2020.

Information about the authors

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

Yulia A. Ketova, researcher, junior researcher, Perm National Research Polytechnic University.

Yan V. Savitskiy, senior lecturer, Perm National Research Polytechnic University.

Kang Wanli, Dr. Sc., professor, China University of Petroleum (East China).

Bauyrzhan Sarsenbekuly, PhD, visiting researcher, China University of Petroleum (East China).

УДК 550.422:546.54-:55.502.4:630*238

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ВЕТРОВОЙ ДЕФЛЯЦИИ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИСТЬЕВ ТОПОЛЯ

Дорохова Любовь Александровна¹,
liubov.ad@yandex.ru

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

Рихванов Леонид Петрович¹

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

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

Актуальность работы заключается в необходимости оценки влияния природных и техногенных факторов окружающей среды на качество атмосферного воздуха, почвенно-растительного покрова и на здоровье населения урбанизированных территорий. Процессом разрушения почвенного покрова под действием ветра является ветровая эрозия или дефляция. Этот процесс широко распространен на территории юга Западной и Восточной Сибири, Дальнем Востоке, особенно в долинах крупных рек, а также в сельскохозяйственных степных районах. Способствуют дефляции сильные ветра в периоды отсутствия осадков, сухие песчаные отложения по берегам рек, ветроударные склоны, почвы легкого гранулометрического состава, пологий рельеф, создающий условия для беспрепятственного продвижения воздушных потоков. Дефляция может проявлять местный характер, в более активной форме виде пыльных бурь наносить большой вред хозяйству.

Цель работы: оценить роль пылевого загрязнения атмосферного воздуха вследствие дефляции на урбанизированных территориях путем изучения элементного состава микроразмерных частиц с использованием листьев тополя в качестве био-геохимического планшета.

Методы. Элементный состав золы образцов листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) изучался методом инструментального нейтронно-активационного анализа, ICP-MS и -AES; элементный состав микроразмерных частиц на поверхности листьев – на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с помощью энергодисперсионного спектрометра Bruker XFlash 4010; обработка полученных данных проводилась методами многомерного статистического анализа.

Результаты. Представлены результаты исследования минеральной пыли из приземного атмосферного воздуха, аккумулирующейся на поверхности листьев тополя. Существенный вклад в распределение редкоземельных элементов на территории населенных пунктов, расположенных на берегах реки Обь (Колпашево, Кургасок, Стрежевой; озера Байкал (Усть-Баргузин и Северобайкальск), реки Амур (Благовещенск, Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре), вносит пылевой фактор в результате дефляции по направлениям господствующих ветров. С помощью индикаторного Zr/Ce отношения определены урбанизированные территории, на которых наблюдается активная ветровая дефляция. Обнаружены минеральные частицы легких и тяжелых редкоземельных элементов, преимущественно фосфаты (монацит и ксенотим), а также цирконы.

Ключевые слова:

Ветровая эрозия, редкоземельные элементы, Zr/Ce отношение, геохимический индикатор, монацит, ксенотим, циркон, листья тополя, нейтронно-активационный анализ, электронная микроскопия.

Введение

Интерес к проблеме загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами (particulate matter – PM) возник относительно недавно – в середине 1990-х гг. Распространенность респираторных заболеваний [1], а также аллергии, рака, расстройств центральной нервной системы и т. д. в городской среде постоянно растет [2–4]. Микрочастицы атмосферы урбанизированных территорий имеют разные размеры. Частицы с размерностью 1–2 и 2,5–10 мкм (PM_{2.5} и PM₁₀ соответственно) оказывают наиболее негативное влияние на здоровье человека [5]. Это связано главным образом с их высокой проникающей способностью [6]. Была доказана способность частиц с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм проникать в бронхиальное дерево, проходить по нему и накапливаться в тканях легких; частицы с диаметром менее 2,5 мкм способны проходить в бронхиолы и альвеолы, а наночастицы с диаметром

менее 0,1 мкм (наиболее мелкие) могут проникать в кровотоки [7].

Значительное влияние на экологическую ситуацию могут оказывать природные геолого-геохимические факторы. В их число входит геохимическая неоднородность геологической среды, обуславливаемая различными комплексами горных пород и осадочных отложений, которые часто содержат акцессорные минералы и концентраты редкоземельных и радиоактивных элементов [8].

Ветровой эрозии (дефляции) в России подвержены многие регионы. Наиболее активным и наносящим наибольший вред видом ветрового выветривания являются пыльные бури, которые часто наблюдаются в последние годы [9]. Эрозия и ее продукты разрушают верхние слои почвы, что, в свою очередь, приводит к снижению ее плодородия, уменьшению гумусового слоя, развитию оврагов на территориях, заиливанию водоемов и погребению русел рек. Каждый год на территории Рос-

сии с пахотных склонов сносится >500 млн т плодородной части почв [10].

К природным факторам дефляции относятся: почвы, имеющие легкий гранулометрический состав и легко поддающиеся разрушению; дефицит влажности почвенного покрова; интенсивные ветра, наиболее выраженные в периоды недостатка осадков; изменения температуры или влажности; рельеф местности (ветроударные склоны), в том числе выровненность территорий, что обуславливает свободное продвижение воздушных потоков. Эти факторы не только создают условия для возникновения эрозии, но и определяют возможность и степень ее проявления [11].

Дефляционные процессы динамичны во времени и пространстве [12]. Это зависит не только от природных факторов, но также и от эффективности противоэрозионных мероприятий [13]. Наиболее активная ветровая деятельность наблюдается главным образом в весенний и летний периоды, и зависит от климата. В засушливые периоды она усиливается [14]. Древесные растения играют значимую роль в снижении ветровой эрозии. Они способны не только «укреплять» поверхность почв, защищая ее от ветра, но и влиять непосредственно на саму скорость ветра [15].

Процессы эрозии, выветривания и осаднения способствуют загрязнению редкоземельными элементами (РЗЭ) почвы, донных отложений, воды и воздуха. Группа РЗЭ является предметом научного интереса геологов, геохимиков, геоэкологов. РЗЭ обладают уникальными физико-химическими свойствами, могут находиться в форме оксидов, карбонатов, металлов [16]. С учетом низких концентрационных свойств в отношении процессов переноса и преобразования в атмосфере РЗЭ являются надежным и мощным инструментом для геохимической характеристики районов с запыленностью [17].

По литературным данным РЗЭ могут оказывать положительное воздействие на живые организмы, например, на регенерацию тканей и на биохимические процессы в растениях [18–20]. Однако при высоких концентрациях РЗЭ становятся токсичными, нарушают кальциевый обмен. РЗЭ обладают значительным потенциалом накапливаться в органах и тканях нервной системы [21]. Лантаноиды способны вызывать гранулематозные поражения легких, пневмокониоз [22–24], что создает угрозу для здоровья населения. Поэтому изучение минеральных форм, содержащих РЗЭ, имеющих как техногенный, так и природный генезис, имеет большое значение.

Таким образом, оценка влияния природных факторов на окружающую среду, определение содержания химических элементов и их минеральных форм нахождения являются важными задачами изучения экологического состояния урбанизированных территорий. РЗЭ являются индикаторами для геохимической характеристики пылевого загрязнения территорий [25].

Цель данного исследования – оценить роль пылевого загрязнения атмосферного воздуха вследствие дефляции на урбанизированных территориях путем изучения элементного состава микроразмерных частиц с использованием листьев тополя в качестве биогеохимического планшета.

Материалы и методы

Объектом исследования являются листья тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), т. к. листья являются природным планшетом, способным улавливать и задерживать палеоаэрозоли из атмосферы [26, 27]. Предмет исследования – элементный и минеральный состав частиц на поверхности листьев тополя.

Среди природных объектов можно использовать листья растений в качестве биогеохимического индикатора загрязнения приземного атмосферного воздуха [28, 29]. Доказано, что листья деревьев эффективно улавливают пылеаэрозоли [30, 31]. Эта экосистемная функция наземных растений обеспечивает сокращение уровня концентрации мелкодисперсных частиц в воздухе, снижая негативное влияние на дыхательную и сердечно-сосудистую системы человека [32].

К самым значимым преимуществам листьев тополя можно отнести их морфологическое и анатомическое строение листовой пластины: наличие клейкого воска, шероховатую поверхность, специфическое расположение устьиц (устьица располагаются на листовой пластине с двух сторон). Листья тополей являются средой, отражающей кратковременный сезонный эффект накопления элементов в течение 4–5 месяцев. Также данный объект позволяет проводить биогеохимическую съемку урбанизированных территорий в различных масштабах по площадной сети [33].

Исследования проводились в 2013–2017 гг. на территории 50 городов. Период сбора материала – конец августа – начало сентября, в фазе наивысшей физиологической активности растений. Образцы листьев отбирали методом средней пробы по окружности в нижней части кроны на высоте 1,5–2 м от земли. Листья помещали в крафт пакеты «Стерит», размером 150×250 мм. Масса сырого материала составила примерно 100 г.

Листья не промывались водой, чтобы сохранить пылевую составляющую пробы. Подготовка материала листьев для элементного анализа заключалась в его сушке до озоления в муфельной печи при 450 °C в течение 5 часов согласно ГОСТу 26929-94. Затем навеска золы весом 100±1 мг паковалась в алюминиевую фольгу.

Для определения содержания РЗЭ в исследуемых образцах проводили инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) по аттестованной методике (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ) в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (ТПУ) (аналитик А.Ф. Судыко). Также использовали спектрометрические методы с индуктивно связанной плазмой (ICP MS и AES) в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток (аналитик Н.В. Зарубина).

Изучение элементного и минерального состава частиц на поверхности листьев тополя проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) Hitachi S-3400N (с приставкой Bruker XFlash 5010 с разрешением 129 eV для проведения рентгено-спектрального анализа). Приставка обеспечивает обнаружение элементов от бора до америция с пределом

обнаружения 1 %. EDS предоставляет информацию об элементах и химических компонентах, составляющих твердые частицы. Данный метод также можно использовать для оценки пыли [34, 35]. При выборе образцов для проведения SEM учитывался геохимический состав проб с высокими концентрациями РЗЭ по имеющимся результатам ИНАА.

Для изучения образцов применялся детектор обратно-рассеянных электронов (BSE) в режиме низкого вакуума (от 50 до 100 Па). Получили информацию о морфологии, химическом составе частиц пыли, также получили карты распределения элементов-индикаторов на поверхности листьев тополя.

Данные для построения розы ветров за период с 31.05.2013 по 01.09.2013 получены с сайта [36] архив погоды с метеостанции г. Благовещенск (аэропорт Игнатьево им. Н.Н. Муравьева-Амурского).

Результаты и обсуждение

В процессе изучения геохимических особенностей листьев тополя выделена группа населённых пунктов с высокими концентрациями редких и редкоземельных элементов. РЗЭ содержатся в дорожной пыли ($d \leq 100$ мкм и

100–2000 мкм) вблизи объектов горнодобывающих предприятий (отвалов и хвостохранилищ) [37]. Их концентрации увеличиваются с уменьшением диаметра частиц [38]. Се используется в качестве легирующего элемента в сварочных электродах [39]. Возможны и природные источники РЗЭ, такие как пыльные бури.

В качестве индикатора, отражающего ветровое природное или техногенное происхождение материала переноса пыли, использовали Zr/Ce отношение. Построена диаграмма в координатах Zr/Ce (рис. 1). На ней выделяются территории городов, где предполагается влияние ветрового переноса. Так, пылевой фактор наиболее выражен в трех районах: 1) река Обь (Колпашево, Каргасок, Стрежевой); 2) озеро Байкал (Усть-Баргузин и Северобайкальск); 3) река Амур (Благовещенск, Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре). Особенностью городов, расположенных в долине реки Оби, является наличие открытых мест крутых берегов (ветроударных склонов) – яров. На восточном берегу озера Байкал и в долине среднего и нижнего Амура развиты пологие формы рельефа с песчаными аллювиальными отложениями (косы), которые подвержены дефляции.

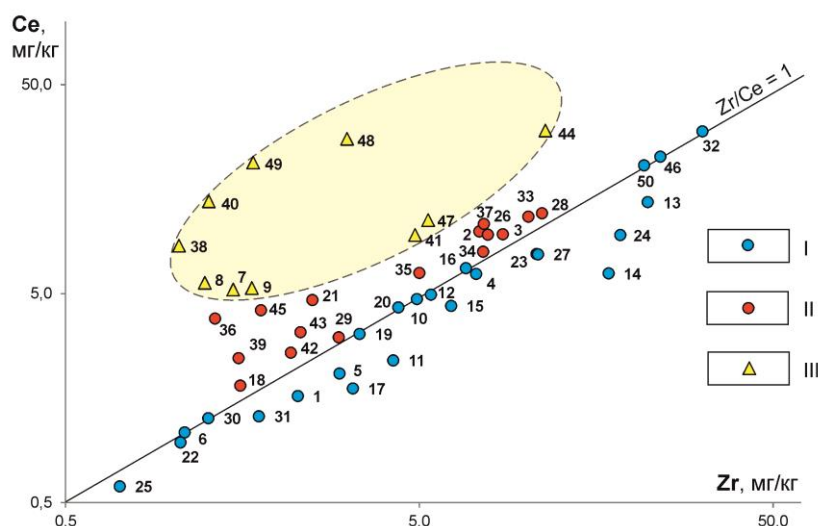


Рис. 1. Соотношение содержания Zr и Ce в золе листьев тополя на исследуемых территориях (Дальний Восток и юг Сибири). Условные обозначения: I – территории с $Zr/Ce \geq 1$; II – территории с $Zr/Ce < 1$; III – территории, находящиеся под воздействием природного пылевого фактора среды (прибрежные речные и озерные пески); 1 – Тюмень, 2 – Тобольск, 3 – Омск, 4 – Новосибирск, 5 – Сургут, 6 – Нижневартовск, 7 – Стрежевой, 8 – Каргасок, 9 – Колпашево, 10 – Томск, 11 – Северск, 12 – Асино, 13 – Новокузнецк, 14 – Междуреченск, 15 – Белово, 16 – Барнаул, 17 – Заринск, 18 – Белокуриха, 19 – Бийск, 20 – Рубцовск, 21 – Горняк, 22 – Акташ, 23 – Красноярск, 24 – Ачинск, 25 – Саяногорск, 26 – Абакан, 27 – Черногорск, 28 – Сорск, 29 – Кызыл, 30 – Хову-Аксы, 31 – Братск, 32 – Иркутск, 33 – Ангарск, 34 – Шелехов, 35 – Слюдянка, 36 – Закаменск, 37 – Улан-Удэ, 38 – Северобайкальск, 39 – Нижнеангарск, 40 – Усть-Баргузин, 41 – Чита, 42 – район урвской эндемии в Забайкалье, 43 – Краснокаменск, 44 – Благовещенск, 45 – Тында, 46 – Якутск, 47 – Нерюнгри, 48 – Хабаровск, 49 – Комсомольск-на-Амуре, 50 – Владивосток

Fig. 1. Ratio of Zr and Ce content in the ash of poplar leaves in the studied areas (the Far East and south Siberia). Legend: I – territories with $Zr/Ce \geq 1$; II – territories with $Zr/Ce < 1$; III – areas under the influence of the natural dust factor of the environment (coastal river and lake sands); 1 – Tyumen, 2 – Tobolsk, 3 – Omsk, 4 – Novosibirsk, 5 – Surgut, 6 – Nizhnevartovsk, 7 – Strezhnevoy, 8 – Kargasok, 9 – Kolpashevo, 10 – Tomsk, 11 – Seversk, 12 – Asino, 13 – Novokuznetsk, 14 – Mezhdurechensk, 15 – Belovo, 16 – Barnaul, 17 – Zarin, 18 – Belokurikha, 19 – Biysk, 20 – Rubtsovsk, 21 – Gorniyak, 22 – Aktash, 23 – Krasnoyarsk, 24 – Achinsk, 25 – Sayanogorsk, 26 – Abakan, 27 – Chernogorsk, 28 – Sorsk, 29 – Kyzyl, 30 – Khovu-Aksy, 31 – Bratsk, 32 – Irkutsk, 33 – Angarsk, 34 – Shelekhov, 35 – Slyudyanka, 36 – Zakamensk, 37 – Ulan-Ude, 38 – Severobaykalsk, 39 – Nizhneangarsk, 40 – Ust-Barguzin, 41 – Chita, 42 – area of endemic in Transbaikalia, 43 – Krasnokamensk, 44 – Blagoveshchensk, 45 – Tynda, 46 – Yakutsk, 47 – Neryungri, 48 – Khabarovsk, 49 – Komsomolsk-on-Amur, 50 – Vladivostok

В программе Statistica проведен факторный анализ методом главных компонент, выделены факторы и оценен их вклад (факторы могут быть любого рода: техногенные, природные и т. д.). В результате полу-

чены вращаемые факторные нагрузки распределения химических элементов в золе листьев тополя, которые могут интерпретироваться как корреляции между факторами и переменными (таблица).

Таблица. Вращаемые факторные нагрузки распределения редкоземельных элементов в золе листьев тополя на урбанизированных территориях, подверженных процессам дефляции

Table. Rotated factor loads of the distribution of rare earth elements in the ash of poplar leaves in urban areas subject to wind erosion

Город City	Фактор Factor	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
Стрежевой Strezhevoy	1	0,95	0,88	0,63	0,93	0,92	0,88	0,72	0,13
	2	0,26	0,17	0,62	0,32	0,12	0,23	0,47	0,93
Каргасок Kargasok	1	0,83	0,61	0,81	0,78	0,84	0,72	0,52	0,61
	2	0,54	0,77	0,58	0,61	0,52	0,66	0,83	0,78
Колпашево Kolpashevo	1	0,74	0,43	0,88	0,89	0,87	0,91	0,81	0,84
	2	0,63	0,90	0,45	0,45	0,49	0,40	0,56	0,51
Северобайкальск Severobaykalsk	1	0,60	0,72	0,44	0,80	0,87	0,81	0,86	0,90
	2	0,77	0,67	0,86	0,60	0,48	0,57	0,49	0,43
Усть-Баргузин Ust-Barguzin	1	0,46	0,13	0,86	0,79	0,73	0,64	0,78	1,00
	2	0,89	0,99	0,52	0,62	0,68	0,77	0,62	0,09
Благовещенск Blagoveshchensk	1	0,92	0,94	0,14	0,92	0,93	0,87	0,76	0,54
	2	0,26	0,23	0,95	0,32	0,18	0,08	0,41	0,65
Хабаровск Khabarovsk	1	0,86	0,81	0,78	0,88	0,88	0,88	0,51	0,34
	2	0,47	0,53	0,41	0,38	0,43	0,40	0,84	0,93
Комсомольск-на-Амуре Komsomolsk-on-Amur	1	0,80	0,83	0,85	0,69	0,67	0,65	0,52	0,47
	2	0,58	0,51	0,49	0,71	0,72	0,74	0,84	0,86

Примечание: жирным шрифтом выделены факторные нагрузки >0,70.

Note: factor loadings >0,70 are highlighted in bold.

Первый фактор считается самым значимым. Он включает в себя действие любых процессов, которые способствуют увеличению концентраций большинства элементов в выборке [40]. В результате анализа выявлено, что первый фактор (природный) влияет на содержание практически всей группы РЗЭ в пробах листьев тополя на исследуемых территориях. Это свидетельствует о связи между этими элементами, а их поступление в атмосферный воздух происходит за счет одного фактора – ветрового переноса.

На примере Благовещенска можно увидеть приуроченность ореолов РЗЭ к поймам и террасам крупных рек. Ореолы с максимальным содержанием РЗЭ наблюдаются вдоль береговых линий рек Амур и Зея, где развиты пологие формы рельефа с сухими песчаными отложениями аллювия (косы), и проявлен ветровой перенос минеральной пыли по розе ветров в результате дефляции (рис. 2).

Наличие высоких концентраций редкоземельных элементов, вероятно, обуславливается влиянием природного фактора [5]. А именно нахождением в атмосфере исследуемой территории большого количества минеральной пыли, состоящей из собственных минералов РЗЭ.

Повышенные концентрации РЗЭ в северо-западной части территории можно объяснить близостью водораздела рек Зея и Амур – возвышенности, подверженной эрозии и дефляции (рис. 2 (IV)). Это природный фактор. Противогололедные мероприятия на этой территории проводятся ограниченно, и они

существенно не влияют на результаты проведенного исследования. Зимы, как правило, малоснежные, дорожные покрытия остаются сухими. Основное количество осадков выпадает во второй половине лета, в период муссонных дождей, которые нивелируют накопившуюся пыль в зимне-весенний период.

В данной работе уличная пыль и береговые склоны рек не изучались, т. к. это не входило в задачи исследования. Однако по опубликованным данным [41] в твердом осадке снега на территории Благовещенска в осенне-зимний период также были обнаружены минеральные фазы, содержащие редкоземельные элементы, представленные в основном фосфатами легких РЗЭ, по составу близкими к монациту, и карбонатами легких РЗЭ – состав близок бабстезиту.

SEM-EDS исследования предоставили подробную информацию о морфологии и структуре отдельных частиц, а также об элементном составе образцов поверхности листьев тополя. Установлены минеральные фазы, содержащие РЗЭ, характеризующие проявление природного фактора. Данные фазы представлены, прежде всего, фосфатами легких РЗЭ, состав которых близок к монациту, в единичных случаях обнаружены микронные зерна тяжелых РЗЭ минералов, по составу близких к ксенотиму (рис. 3). Во всех городах преобладают минеральные фазы, по составу близкие к монациту-(Ce), исключение составляет Усть-Баргузин, где преобладающей формой нахождения РЗЭ является, вероятно, монацит-(La).

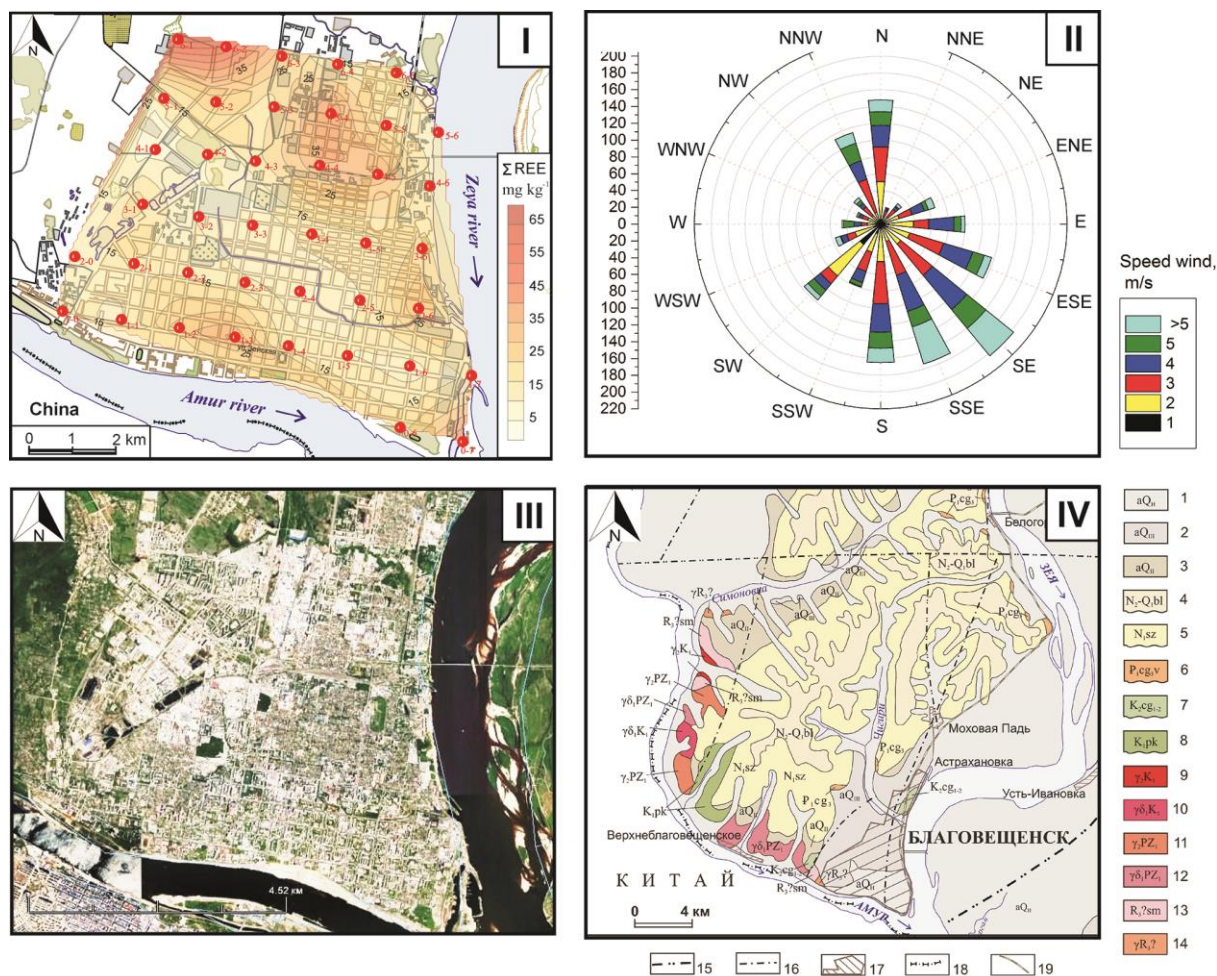


Рис. 2. Проявление дефляции на территории г. Благовещенска: биогеохимические ореолы суммы РЗЭ (I), летняя роза ветров (2013) (II), трансграничная агломерация Благовещенск–Хэйхэ в районе слияния рек Амур и Зейя (III). Геологическая карта территории г. Благовещенска и его окрестностей (IV): 1 – голоцен; 2, 3 – неоплейстоцен; 4 – белогорская свита; 5 – сазанковская свита; 6, 7 – цагоянская свита; 8 – поярковская свита; 9, 10 – раннемеловые интрузии; 11, 12 – раннепалеозойские интрузии; 13 – позднерифейские интрузии; 14 – симоновкинская толща; 15 – Зейско-Селемджинский глубинный разлом; 16 – разрывные нарушения; 17 – урбанизированная территория; 18 – Государственная граница; 19 – железная дорога

Fig. 2. Wind erosion in the territory of Blagoveshchensk: biogeochemical halos of REE (I), summer wind rose plot for 2013 (II), the cross-border agglomeration of Blagoveshchensk–Heihe in the confluence of the Amur and Zeya (III). Geological map of the territory of Blagoveshchensk and environs (IV): 1 – holocene; 2, 3 – neopleistocene; 4 – belogorskaya formation; 5 – sazankovskaya formation; 6, 7 – tsagoyanskaya formation; 8 – poyarovskaya suite; 9, 10 – early cretaceous intrusions; 11, 12 – early paleozoic intrusions; 13 – late riphean intrusions; 14 – simonovkinskaya sequence; 15 – Zeisko-Selemdzhinsky deep fault; 16 – breaking violations; 17 – urbanized area; 18 – State border; 19 – railroad

SEM-изображения выявили широкий диапазон размеров частиц: самые крупные частицы пыли с РЗЭ обнаружены на поверхности листьев тополя в единичных случаях в Хабаровске (до 20 мкм), преобладающая размерность частиц составила 2–10 мкм. Частицы РЗЭ имеют преимущественно угловатую форму. Некоторые минералы содержали примесь железа 2,7–7,16 % (рис. 3, в). В статье [42] приводятся примеры структур, которые образовались при участии микроорганизмов. Известно, что железоокисляющие бактерии (хемолитотрофы) способны получать энергию, окисляя Fe (II) до Fe (III) [43]. Установлено, что бактерии способны

накапливать лантаноиды в концентрациях, которые превышают в миллионы раз концентрации этих элементов в природных средах [35]. Кроме того, встречаются и алюмосиликатные частицы с вкрапленностью фосфата редких земель (рис. 4).

Также обнаружены микрозерна, вероятно, циркона (рис. 5). Они имеют преимущественно угловатую форму и меньший размер (>1–3 мкм) по сравнению с РЗЭ. Редкие зерна циркона имели размер до 7 мкм, правильную и неправильную формы. В некоторых зернах циркона встречалась примесь железа до 1 %.

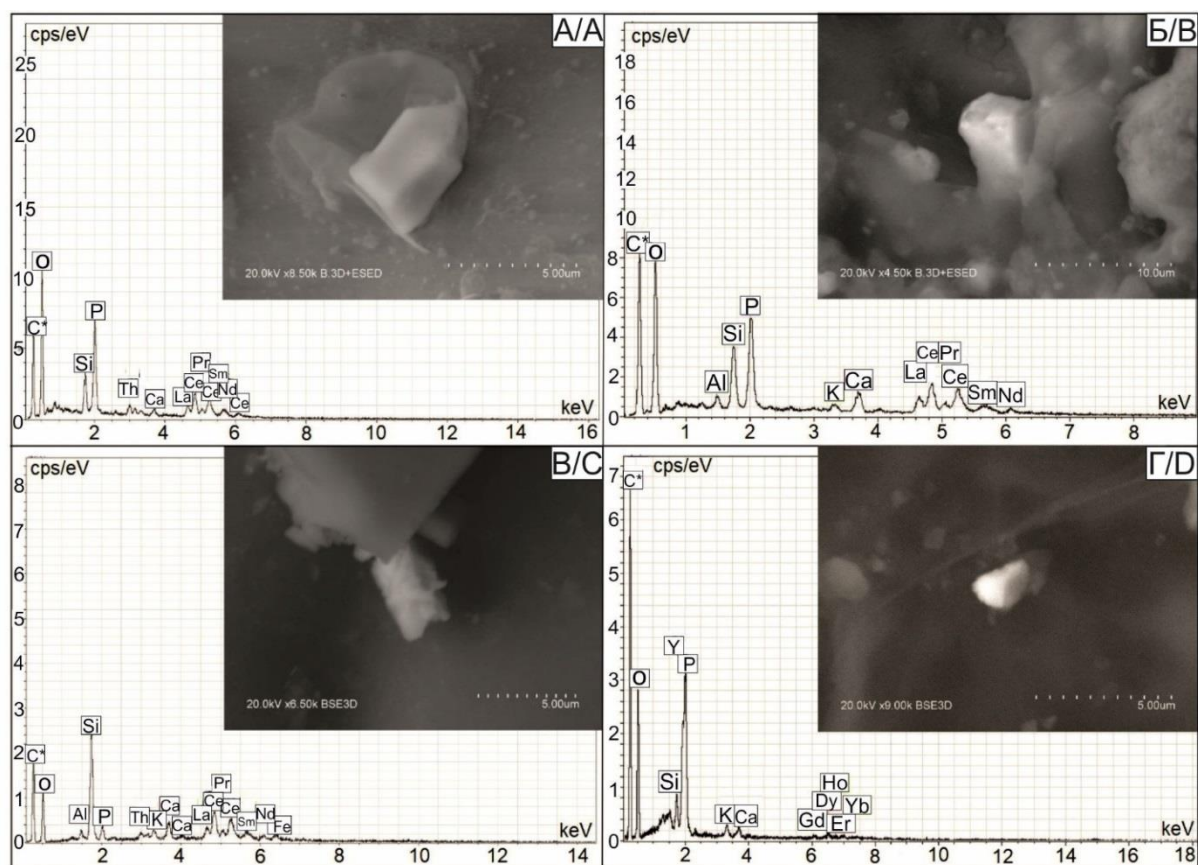


Рис. 3. Формы нахождения редкоземельных минералов на поверхности листа тополя и их энергодисперсионные спектры: А) Хабаровск; Б) Колпашево; В) Северобайкальск; Г) Стржевой

Fig. 3. Rare-earth minerals department on the surface of a poplar leaf and its EDX spectrums: А) Khabarovsk; В) Kolpashevo; С) Severobaykalsk; D) Strezhevoy

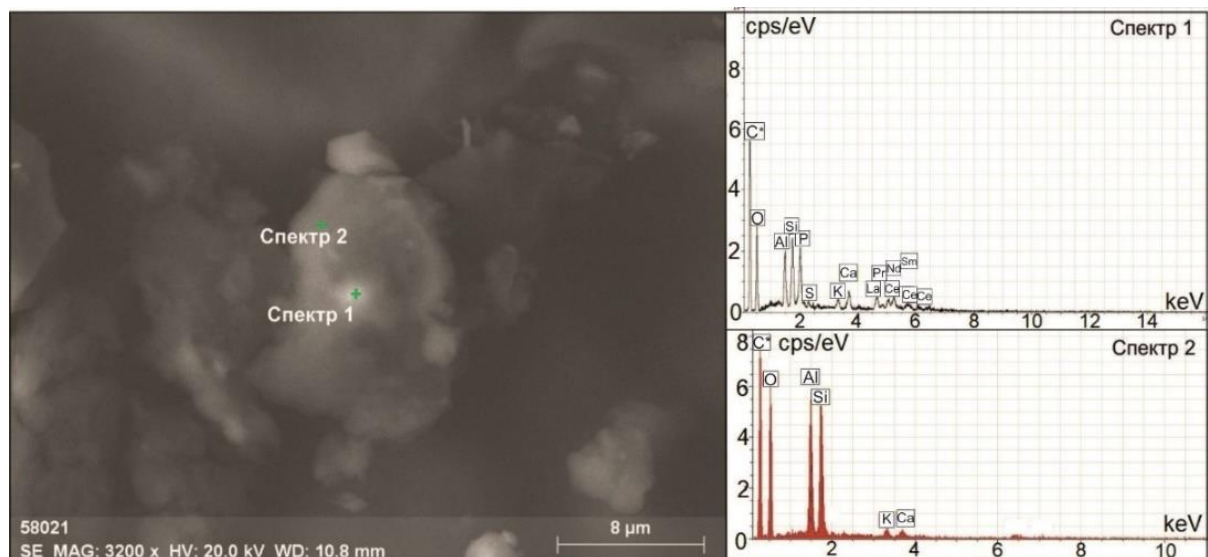


Рис. 4. Редкоземельный минерал в алюмосиликатной частице и ее энергодисперсионные спектры (г. Хабаровск)

Fig. 4. Rare-earth mineral in aluminum silicate particle and its EDX spectrums (Khabarovsk)

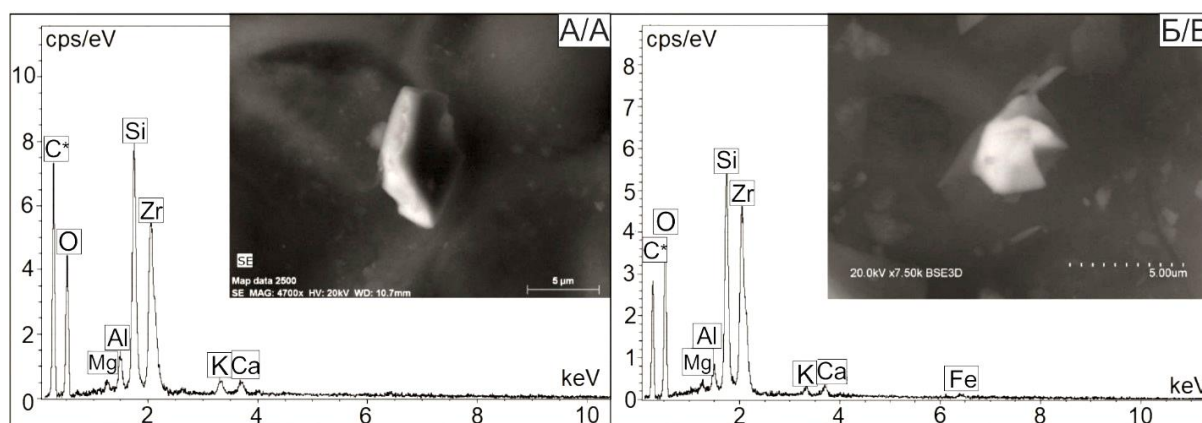


Рис. 5. Результаты электронно-микроскопических исследований минеральных частиц циркона на поверхности листьев тополя и их энергодисперсионные спектры: А) Хабаровск; Б) Северобайкальск

Fig. 5. Results of electron microscopic studies of zircon mineral particles on the surface of poplar leaves and its EDX spectrums: A) Khabarovsk; B) Severobaykalsk

Выводы

1. Zr/Ce отношение является важным индикаторным показателем, позволяющим выявить источники ветрового переноса минеральной пыли. По минералого-геохимическому составу проб выделена группа городов с вероятным преобладанием продуктов ветрового переноса – РЗЭ: Колпашево, Каргасок, Стрежевой, Усть-Баргузин, Северобайкальск, Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре, Благовещенск и другие. Характерной особенностью территорий этих городов является наличие открытых участков и береговых пространств, на которых происходит ветровая дефляция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Impact evaluation of environmental factors on respiratory function of asthma patients living in urban territory / L.V. Veremchuk, K. Tsarouhas, T.I. Vitkina, E.E. Mineeva, T.A. Gvozdenko, M.V. Antonyuk, V.N. Rakitskii, K.A. Sidletskaia, A.M. Tsatsakis, K.S. Golokhvast // Environmental Pollution. – 2018. – V. 235. – P. 489–496.
2. Катола В.М., Комогорцева В.Е. Пыль: источники образования, ее общая характеристика, пылевые заболевания (краткий обзор) // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. – 2018. – Вып. 67. – С. 111–116.
3. Экологические риски от влияния токсичных элементов в атмосферном воздухе на основе изучения снежного покрова в районе расположения томской ГРЭС-2 / Н.А. Осипова, А.В. Таловская, Е.А. Филимонов, Е.Г. Язиков, С.А. Новиков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 54–69.
4. Effects of neighborhood green space on PM2.5 mitigation: evidence from five megacities in China / M. Chen, F. Dai, B. Yang, S. Zhu // Building and Environment. – 2019. – V. 159. – P. 33–45.
5. Characteristics and environmental significance of rare earth elements in PM2.5 of Nanchang, China / Z. Yang, Y. Ruilian, H. Gongren, L. Xiaohui, L. Xianrong // Journal of rare earths. – 2017. – V. 35. – № 1. – P. 98–106.
6. Микроразмерное загрязнение атмосферы города Благовещенска / К.С. Голохваст, В.В. Кодинцев, И.Э. Памирский, В.В. Чайка, Р.А. Белоус // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. – 2016. – Вып. 60. – С. 52–56.
7. Ревич А.Б. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // ПЭММЭ. – 2018. – Т. 29. – № 3. – С. 53–78.

2. На поверхности листьев тополя зафиксированы природные минералы, представленные преимущественно фосфатами легких РЗЭ, а также тяжелыми РЗЭ и цирконом. Эти данные позволяют говорить о влиянии ветрового переноса минеральных частиц с береговых пространств крупных рек и озер.
3. Листья тополя являются биогеохимическим планшетом, способным улавливать и задерживать минеральные частицы пыли из атмосферы. Прослежена взаимосвязь между распределением микроэлементов в частицах пыли на поверхности листьев и влиянием ветровой дефляции. Микроэлементный анализ листьев позволяет получать информацию о составе, генезисе атмосферной пыли, рассеянной в окружающей среде.
8. Biomonitoring of airborne metals using tree leaves: protocol for biomonitor selection and spatial trend / Y. Hajizadeh, M. Mokhtari, M. Faraji, A. Abdolhnejad, A. Mohammadi // MethodsX. – 2019. – V. 6. – P. 1694–1700.
9. Волкова Ю.В. Скорость начала трогания и транспорт частиц грунта при ветровой эрозии почв: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2002. – 19 с.
10. Шойгу С.К., Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л. Безопасность России. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. – М.: МГФ «Знание», 1999. – 588 с.
11. Глушко А.Я. Влияние водной и ветровой эрозии на земельный фонд юга европейской части России // Естественные и точные науки. – 2010. – № 1. – С. 75–85.
12. Абумуслимов А.А. Анализ эколого-генетических рядов растительных сообществ для оценки дефляции и эволюции пустынь северо-западного Прикаспия: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Махачкала, 2004. – 28 с.
13. Рулев А.С., Беляков А.М., Сарычев А.Н. Исследование проявления дефляции почв в условиях Волгоградской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2016. – Т. 42. – № 2. – С. 101–107.
14. Куанышбаев С.Б., Гурьянова О.Н. Ветровая эрозия на территории Костанайской области // Вестник КГПИ. – 2008. – Т. 10. – № 2. – С. 178–184.
15. Дьяченко А.Е., Макарычев Н.Г. Дефляция почв и агрометеорологические мероприятия в Северном Казахстане. – М.: АН СССР, 1959. – 112 с.
16. Temporally explicit life cycle assessment as an environmental performance decision making tool in rare earth project development / R. Pell, F. Walla, X. Yan, J. Li, Z. Zeng // Minerals Engineering. – 2019. – V. 135. – P. 64–73.

17. Mineralogy and geochemistry of atmospheric particulates in western Iran / H. Ahmady-Birgani, H. Mirnejad, S. Feiznia, K. McQueen // *Atmospheric Environment*. – 2015. – V. 119. – P. 262–272.
18. Кожевникова Н.М. Получение модифицированных лантаном природных цеолитов – потенциальных стимуляторов регенерации живых тканей // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2011. – № 9. – С. 207–211.
19. Маладаев А.А. Влияние лантана на биологическую активность почв, урожай и качество растений: дис. ... канд. биол. наук. – Улан-Удэ, 2007. – 125 с.
20. Boldyreva A.A. Lanthanum potentiates GABA-activated currents in rat pyramidal neurons of CA1 hippocampal field // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. – 2005. – V. 140. – № 4. – P. 403–405.
21. Rare earth elements (REEs) as pollution indicator in sediment of Linggi River, Malaysia / M.S. Elias, S. Ibrahim, K. Samudung, N. Kantasamy, S.A. Rahman, A. Hashim // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2019. – V. 151. – P. 116–123.
22. Lanthanide particles in the lung of a printer / A. Dufresne, G. Krier, J.F. Muller, B. Case, G. Perrault // *The Science of the Total Environment*. – 1994. – V. 151. – № 3. – P. 249–252.
23. Hirano S., Suzuki K.T. Exposure, metabolism, and toxicity of rare earths and related compounds // *Environ. Health Perspect.* – 1996. – V. 104. – P. 85–95.
24. Trace elements in tissues of a worker affected by rare earth pneumoconiosis. A study carried out by neutron activation analysis / R. Pietra, E. Sabbioni, L. Ubertalli, E. Orvini, G. Vocaturo, F. Colombo, M. Zanon // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1985. – V. 92. – № 2. – P. 247–259.
25. Determination of Rare Earth Elements in multi-year high-resolution Arctic aerosol record by double focusing Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry with desolvation nebulizer inlet system / F. Giardi, R. Traversi, S. Becagli, M. Severi, L. Caiazzo, C. Ancillotti, R. Udisti // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 613–614. – P. 1284–1294.
26. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, А.Р. Ялалтдинова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 25–36.
27. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis / D.V. Yusupov, N.V. Baranovskaya, Yu.V. Robertus, V.V. Radomskaya, L.M. Pavlova, A.F. Sudyko, L.P. Rikhvanov // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – P. 27111–27123.
28. Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil / G.M. Locosselli, K. Chacon-Madrid, M.A.Z. Arruda, E.P. Camargo, T.C. Moreira, C.D.S. Andre, P.A. Andre, J.M. Singer, P.H.N. Saldiva, M.S. Buckeridge // *Environmental Pollution*. – 2018. – V. 242. – P. 320–328.
29. Should we see urban trees as effective solutions to increasing ozone levels in cities? / P. Sicard, E. Agathokleous, V. Araminiene, E. Carrari, Y. Hoshika, A. de Marco, E. Paoletti // *Environmental Pollution*. – 2018. – V. 243. – P. 163–176.
30. Influence of rainfall duration and intensity on particulate matter removal from plant leaves / X. Xu, Z. Zhang, L. Bao, Li. Moa, X. Yu, D. Fan, X. Lun // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 609. – P. 11–16.
31. PM_{2.5}-bound SO₄²⁻ absorption and assimilation of poplar and its physiological responses to PM_{2.5} pollution / Q. Yang, H. Wang, J. Wang, M. Lu, C. Liu, X. Xia, W. Yin, H. Guo // *Environmental and Experimental Botany*. – 2018. – V. 153. – P. 311–319.
32. Голохваст К.А. Нано- и микроразмерные частицы атмосферных взвесей и их экологический эффект (на примере городов юга Дальнего Востока): дис. ... д-ра биол. наук. – Владивосток, 2014. – 310 с.
33. Радиоактивные элементы (торий, уран) в листьях тополя на урбанизированных территориях и их индикаторная роль / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко, Н.В. Барановская, Л.А. Дорохова // *Разведка и охрана недр*. – 2019. – № 2. – С. 61–68.
34. Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} Source Profiles of Fugitive Dust in Zhengzhou, China / N. Jiang, Z. Dong, Y. Xu, F. Yu, S. Yin, R. Zhang, X. Tang // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2018. – V. 18. – P. 314–329.
35. Anderson C.R., Pederson K. In Situ growth of Gallionella biofilms and partitioning of lanthanides and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides // *Geobiology*. – 2003. – V. 1. – P. 169–178.
36. Погода в Благовещенске // Расписание погоды, 2004. URL: www.rp5.ru (дата обращения 15.05.2019).
37. Tian S., Liang T., Li K. Fine road dust contamination in a mining area presents a likely air pollution hotspot and threat to human health // *Environment International*. – 2019. – V. 128. – P. 201–209.
38. Settled iron-based road dust and its characteristics and possible association with detection in human tissues / K. Cabanova, K. Hrabovska, P. Matejkova, K. Dedkova, V. Tomasek, J. Dvorackova, J. Kukutschova // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – V. 26. – № 3. – P. 1–10.
39. Source and path identification of metals pollution in a mining area by PMF and rare earth element patterns in road dust / S.H. Tian, T. Liang, K.X. Li, L.Q. Wang // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 633. – P. 958–966.
40. Многомерный статистический анализ содержаний элементов в снеговом покрове г. Благовещенска / И.В. Радомская, Д.В. Юсупов, Л.М. Павлова, А.Г. Сергеева, Н.А. Бородин // *Региональная экология*. – 2018. – Т. 52. – № 2. – С. 15–28.
41. Radomskaya V.I., Yusupov D.V., Pavlova L.M. Rare-Earth Elements in the atmospheric precipitation of the city of Blagoveshchensk // *Geochemistry international*. – 2018. – V. 56. – № 2. – P. 189–198.
42. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор / Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик, Н.Л. Добрецов, А.В. Толстов, Б.Л. Щербов, Н.С. Карманов, Е.Ю. Герасимов, А.В. Брянская // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56. – № 6. – С. 1080–1115.
43. Пиневиц А.В. Микробиология железа и марганца. – СПб.: Изд-во С.-Пб унив., 2005. – 372 с.

Поступила 15.10.2020 г.

Информация об авторах

Дорохова Любовь Александровна, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Юсупов Дмитрий Валерьевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и природопользования, Амурский государственный университет; доцент отделения геологии инженерной школы природных, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Рихванов Леонид Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 550.422:546.54-:55:502.4:630*238

GEOCHEMICAL AND MINERAL INDICATORS OF DEFLATION IN URBAN AREAS USING POPLAR LEAVES

Lyubov A. Dorokhova¹,
liubov.ad@yandex.ru

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

Leonid P. Rikhvanov¹

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

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

Relevance of the work is caused by the need to assess the impact of natural and technogenic environmental factors affecting the quality of atmospheric air, soil and vegetation as well as the health of the population in urban areas. Deflation or wind erosion is soil destruction under the influence of wind. The territories in the south of Western and Eastern Siberia, the Far East, located in the valleys of large rivers, as well as in agricultural steppe regions, are especially affected by it. Winds during the periods without precipitation, dry sandy deposits along river banks, wind-impact slopes, soils of light particle size distribution, gently sloping terrain, creating conditions for unhindered movement of air flows, contribute to wind erosion. It can be local in nature, in a more active form of dust storms cause great harm to the economy.

The aim of the research is to evaluate the role of atmospheric dust pollution in urban areas by studying the elemental composition of micro-sized particles using poplar leaves as a biogeochemical tablet.

The methods. The elemental composition of ash samples of balsamic poplar leaves (*Populus balsamifera* L.) was studied by instrumental neutron activation analysis, ICP-MS and -AES; the elemental composition of micro-sized particles on the leaf surface – at a Hitachi S-3400N scanning electron microscope using a Bruker XFlash 4010 energy dispersive spectrometer; data processing was carried out using of the multivariate statistical methods.

The results. The paper presents the results of the study of mineral dust from surface air, accumulated on the surface of poplar leaves. A significant contribution to the distribution of rare-earth elements on the territory of settlements located on the banks of the Ob River (Kolpashevo, Kargasok, Strezhevoy; Lake Baikal (Ust-Barguzin and Severobaykalsk), Amur River (Blagoveshchensk, Khabarovsk, Komsomolsk-on-Amur) makes a dust transfer as a result of deflation in the directions of the prevailing winds. Using the indicator Zr/Ce ratio, urbanized areas with active wind erosion were determined. Mineral particles of light and heavy rare earth elements, mainly phosphates (monazite and xenotime), as well as zircons, were found.

Key words:

Wind erosion, rare earth elements, Zr/Ce ratio, geochemical indicator, monazite, xenotime, zircon, poplar leaves, neutron activation analysis, SEM-EDS.

REFERENCES

- Veremchuk L.V., Tsarouhas K., Vitkina T.I., Mineeva E.E., Gvozdenko T.A., Antonyuk M.V., Rakitskii V.N., Sidletskaya K.A., Tsatsakis A.M., Golokhvast K.S. Impact evaluation of environmental factors on respiratory function of asthma patients living in urban territory. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 235, pp. 489–496.
- Katola V.M., Komogorceva V.E. Dust: sources of formation, its general characteristics and dust diseases (brief review). *Bulletin of Physiology and Respiratory Pathology*, 2018, vol. 67, pp. 111–116. In Rus.
- Osipova N.A., Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G., Novikov S.A. Environmental risks from the influence of toxic elements in the air based on the study of snow cover in the area of Tomsk hydro-electric station 2. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 54–69. In Rus.
- Chen M., Dai F., Yang B., Zhu S. Effects of neighborhood green space on PM_{2.5} mitigation: Evidence from five megacities in China. *Building and Environment*, 2019, vol. 159, pp. 1–43.
- Yang Z., Ruilian Y., Gongren H., Xiaohui L., Xianrong L. Characteristics and environmental significance of rare earth elements in PM_{2.5} of Nanchang, China. *Journal of rare earths*, 2017, vol. 35, no. 1, pp. 98–106.
- Golokhvast K.S., Kodincev V.V., Pamirskij I.E., Chajka V.V., Belous R.A. Microdimensional air pollution of atmosphere in Blagoveshchensk. *Bulletin of respiratory physiology and pathology*, 2016, vol. 60, pp. 52–56. In Rus.
- Revich A.B. Fine suspended particulates in ambient air and their health effect in megalopolises. *PEMME*, 2018, vol. 29, no. 3, pp. 53–78. In Rus.
- Hajizadeh Y., Mokhtari M., Faraji M., Abdolhnejad A., Mohammadi, A. Biomonitoring of airborne metals using tree leaves: protocol for biomonitor selection and spatial trend. *MethodsX*, 2019, vol. 6, pp. 1694–1700.
- Volkova Yu.V. *Skorost nachala trovaniya i transport chastic grunta pri vetrovoy erozii pochv*. Avtoreferat. Dis. Kand. nauk [The start velocity and transport of soil particles during wind erosion of soils. Cand. Diss. Abstract]. St-Petersburg, 2002. 19 p.
- Shoigu S.K., Vladimirov V.A., Vorobiev Yu.L. *Bezopasnost Rossii. Zashchita naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera* [The security of Russia. Protection of the population and territories from natural and technogenic character]. Moscow, Znanie Publ., 1999. 588 p.
- Glushko A.Ya. *Vliyanie vodnoy i vetrovoy erozii na zemelny fond yuga evropeyskoy chasti Rossii* [The influence of water and wind erosion on the land fund of the European part of Russia]. *Natural and exact sciences*, 2010, no. 1, pp. 75–85. In Rus.
- Abumuslimov A.A. *Analiz ekologo-geneticheskikh ryadov rastitelnykh soobshchestv dlya otsenki deflyatsii i evolyutsii pustyn severo-zapadnogo Prikaspiya*. Aftoreferat Dis. Kand. nauk [Analysis of ecological-genetic series of plant communities to assess deflation and evolution of deserts of the northwestern Caspian. Cand. Diss. Abstract]. Mahachkala, 2004. 28 p.

13. Rulev A.S., Belyakov A.M., Sarychev A.N. Soil deflation occurrence research in Volgograd region conditions. *Bulletin of the Lower Volga Agro-University Complex*, 2016, vol. 42, no. 2, pp. 101–107. In Rus.
14. Kuanyshbaev S.B., Guryanova O.N. Vetrovaya eroziya na territorii Kostanayskoy oblasti [Wind erosion in the Kostanay region]. *Vestnik KGPI*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 178–184.
15. Dyachenko A.E., Makarychev N.G. *Deflyatsiya pochv i agromeliorativnye meropriyatiya v Severnom Kazahstane* [Soil deflation and land reclamation measures in Northern Kazakhstan]. Moscow, AN SSSR Publ., 1959. 112 p.
16. Pell R., Walla F., Yan X., Li J., Zeng Z. Temporally explicit life cycle assessment as an environmental performance decision making tool in rare earth project development. *Minerals Engineering*, 2019, vol. 135, pp. 64–73.
17. Ahmady-Birgani H., Mirnejad H., Feiznia S., McQueen K. Mineralogy and geochemistry of atmospheric particulates in western Iran. *Atmospheric Environment*, 2015, vol. 119, pp. 262–272.
18. Kozhevnikova N.M. Poluchenie modifitsirovannykh lantanom prirodnykh tselolitov – potentsialnykh stimulyatorov regeneratsii zhivnykh tkaney [Obtaining lanthanum-modified natural zeolites – potential stimulants for the regeneration of living tissues]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2011, no. 9, pp. 207–211.
19. Maladaev A.A. *Vliyanie lantana na biologicheskuyu aktivnost pochv, urozhay i kachestvo rasteniy*. Dis. Kand. nauk [The effect of lanthanum on the biological activity of soils, crop and plant quality. Cand. Diss.]. Ulan-Ude, 2007. 125 p.
20. Boldyreva A.A. Lanthanum potentiates GABA-activated currents in rat pyramidal neurons of CA1 hippocampal field. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 2005, vol. 140, no. 4, pp. 403–405.
21. Elias M.S., Ibrahim S., Samudung K., Kantasamy N., Rahman S.A., Hashim A. Rare earth elements (REEs) as pollution indicator in sediment of Linggi River, Malaysia. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, vol. 151, pp. 116–123.
22. Dufresne A., Krier G., Muller J.F., Case B., Perrault G. Lanthanide particles in the lung of a printer. *The Science of the Total Environment*, 1994, vol. 151, no. 3, pp. 249–252.
23. Hirano S., Suzuki K.T. Exposure, metabolism, and toxicity of rare earths and related compounds. *Environmental Health Perspect.*, 1996, vol. 104, pp. 85–95.
24. Pietra R., Sabbioni E., Ubertalli L., Orvini E., Vocaturo G., Colombo F., Zannoni M. Trace elements in tissues of a worker affected by rare earth pneumoconiosis. A study carried out by neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1985, vol. 92, no. 2, pp. 247–259.
25. Giardi F., Traversi R., Becagli S., Severi M., Caiazza L., Ancillotti C., Udisti R. Determination of Rare Earth Elements in multi-year high-resolution Arctic aerosol record by double focusing Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry with desolvation nebulizer inlet system. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 613–614, pp. 1284–1294.
26. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Yalaltdinova A.R. Geochemical features of the elemental composition of poplar leaves in urban areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 25–36. In Rus.
27. Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Robertus Yu.V., Radomskaya V.V., Pavlova L.M., Sudyko A.F., Rikhvanov L.P. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 27111–27123.
28. Locosselli G.M., Chacon-Madrid K., Arruda M.A.Z., Camargo E.P., Moreira T.C., Andre C.D.S., Andre P.A., Singer J.M., Saldiva P.H.N., Buckeridge M.S., Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 242, pp. 320–328.
29. Sicard P., Agathokleous E., Araminiene V., Carrari E., Hoshika Y., De Marco A., Paoletti E. Should we see urban trees as effective solutions to increasing ozone levels in cities? *Environmental Pollution*, 2018, vol. 243, pp. 163–176.
30. Xu X., Zhang Z., Bao L., Moa Li., Yu X., Fan D., Lun X. Influence of rainfall duration and intensity on particulate matter removal from plant leaves. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 609, pp. 11–16.
31. Yang Q., Wang H., Wang J., Lu M., Liu C., Xia X., Yin W., Guo H. PM_{2.5}-bound SO₄²⁻ absorption and assimilation of poplar and its physiological responses to PM_{2.5} pollution. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, vol. 153, pp. 311–319.
32. Golohvast K.A. *Nano- i mikrorazmernye chastitsy atmosferykh vzvesey i ikh ekologicheskiiy effekt (na primere gorodov yuga Dal'nego Vostoka)*. Dis. Dokt. nauk [Nano- and micro-sized particles of atmospheric suspensions and their environmental effect (on the example of cities in the south of the Far East). Cand. Diss.]. Vladivostok, 2014. 310 p.
33. Yusupov D.V., Rihvanov L.P., Sudyko A.F., Baranovskaya N.V., Dorokhova L.A. Radioactive elements (thorium, uranium) in poplar leaves in urban areas and their indicator role. *Exploration and mineral protection*, 2019, no. 2, pp. 61–68. In Rus.
34. Jiang N., Dong Z., Xu Y., Yu F., Yin S., Zhang R., Tang X. Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} Source Profiles of Fugitive Dust in Zhengzhou, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, vol. 18, pp. 314–329.
35. Anderson C.R., Pederson K. In Situ growth of Gallionella biofilms and partitioning of lanthanides and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides. *Geobiology*, 2003, vol. 1, pp. 169–178.
36. *Pogoda v Blagoveshchenske* [Weather in Blagoveshchensk]. *Raspisanie pogody*, 2004. Available at: www.rp5.ru (accessed 15 May 2019).
37. Tian S., Liang T., Li K. Fine road dust contamination in a mining area presents a likely air pollution hotspot and threat to human health. *Environment International*, 2019, vol. 128, pp. 201–209.
38. Cabanova K., Hrabovska K., Matejkova P., Dedkova K., Tomasek V., Dvorackova J., Kukutschova J. Settled iron-based road dust and its characteristics and possible association with detection in human tissues. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 1–10.
39. Tian S.H., Liang T., Li K.X., Wang L.Q. Source and path identification of metals pollution in a mining area by PMF and rare earth element patterns in road dust. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 633, pp. 958–966.
40. Radomskaya I.V., Yusupov D.V., Pavlova L.M., Sergeeva A.G., Borodina N.A. Multivariate statistical analysis of element contents in the snow cover of Blagoveshchensk. *Regional Ecology*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 15–28. In Rus.
41. Radomskaya V.I., Yusupov D.V., Pavlova L.M. Rare-Earth Elements in the Atmospheric Precipitation of the city of Blagoveshchensk. *Geochemistry international*, 2018, vol. 56, no. 2, pp. 189–198.
42. Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobrecov N.L., Tolstov A.V., Shcherbov B.L., Karmanov N.S., Gerasimov E.Yu., Bryanskaya A.V. Major minerals of abnormally high-grade ores of the tomor deposit (Arctic Siberia). *Geology and geophysics*, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 1080–1115. In Rus.
43. Pinevich A.V. *Mikrobiologiya zheleza i margantsa* [Microbiology of iron and manganese]. St.-Petersburg, St.-Petersburg University Publ., 2005. 372 p.

Received: 15 October 2020.

Information about the authors

Lyubov A. Dorokhova, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry V. Yusupov, associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University; Cand. Sc., assistant professor, Amur State University.

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

УДК622.279.8:66.081.2

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АБСОРБЦИИ ПРИ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКЕ ГАЗА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Кутуков Владислав Владимирович¹,
Kutukov_Vlad@rambler.ru

Пономарёв Александр Иосифович¹,
pnmrv@mail.ru

Чеботарёв Виктор Васильевич¹,
kafedrargkm@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. Дезтанизированный газовый конденсат является ценным сырьем для нефтепереработки и нефтехимического производства, поэтому увеличение степени его извлечения из газа газоконденсатных месторождений на промышленных установках является актуальной научно-технической задачей.

Цель: обосновать возможность увеличения выхода нестабильного конденсата-фракции C_{3+} из потока газа на действующей промышленной установке комплексной подготовки газа и конденсата одного из нефтегазоконденсатных месторождений Крайнего Севера за счет оптимизации рабочих параметров процесса низкотемпературной абсорбции.

Объект: промышленная установка низкотемпературной абсорбции.

Метод: моделирование процессов сепарации и низкотемпературной абсорбции в среде программного комплекса «PetroSim».

Результаты. Исследовано влияние давления и температуры, расхода газа, удельного расхода и состава абсорбента – нестабильного конденсата, на эффективность процесса подготовки газа и конденсата на компьютерной модели промышленной установки низкотемпературной абсорбции и низкотемпературной сепарации. Показано, что использование процесса низкотемпературной абсорбции на последней ступени сепарации для рассматриваемого состава сырого газа обеспечивает выход целевой фракции C_{3+} примерно в 2 раза больше в широком диапазоне давлений и температур по сравнению с процессом низкотемпературной сепарации. Обоснована возможность увеличения степени извлечения в товарный нестабильный конденсат фракции C_{3+} на последней ступени сепарации в процессе низкотемпературной абсорбции на 21 % только за счет оптимизации режимных параметров работы установки без изменения технологической схемы. При часовом расходе сырого газа 225 тыс. м³/ч оптимизацией термобарических параметров процесса низкотемпературной абсорбции – изменением давления с 3,75 до 5,0 МПа и температуры с минус 30 до минус 35 °С, извлечение фракции C_{3+} в нестабильный товарный конденсат повышается на 6,6 г/м³ сырого газа без модернизации технологической схемы установки, т. е. на 35 т/сутки с соответствующим сокращением ее уноса с товарным газом. При «утяжелении» компонентного состава абсорбента путем снижения давления в разделителе нестабильного конденсата первой ступени сепарации степень извлечения фракции C_{3+} в товарный нестабильный конденсат в низкотемпературном абсорбере повышается на 25 %, т. е. еще на 6,6 г/м³, или 7 т/сутки дополнительно с соответствующим дальнейшим сокращением ее содержания в товарном газе. Но реализация такого режима уже требует минимальной модернизации установки низкотемпературной абсорбции путем врезки насоса в технологический трубопровод подачи нестабильного конденсата орошения с разделителя Р-1 в низкотемпературный абсорбер, которая окупается в короткие сроки.

Ключевые слова:

Газоконденсатное месторождение, промышленная подготовка газа, низкотемпературная абсорбция, компьютерное моделирование, термобарические условия, газ сепарации, выход нестабильного конденсата, абсорбент, насос.

Введение

Традиционной технологией извлечения нестабильного конденсата из газа на установках комплексной подготовки газа и конденсата (УКПГ), используемой газодобывающими компаниями на месторождениях Крайнего Севера, является низкотемпературная сепарация (НТС) на температурном уровне до минус 30 °С [1–5].

Данная технология была первой и практически остается единственной на газоконденсатных месторождениях России [6, 7]. Основным достоинством установок НТС является их относительная простота – в них нет массообменных аппаратов и используется небольшое количество технологических аппаратов и отсутствуют массообменные процессы. К недостат-

кам технологии НТС можно отнести невысокую степень извлечения нестабильного конденсата из газа с небольшим содержанием тяжёлых углеводородов [8]. На сегодняшний день большинство базовых месторождений ПАО «Газпром» находится на стадии падающей добычи со снижающимися конденсатным фактором. Установки низкотемпературной абсорбции (НТА) технологически несколько сложнее и более капиталоемки, но позволяют существенно сократить унос фракции C_{3+} с газом сепарации и соответственно увеличить выход нестабильного конденсата [9]. Однако и они периодически нуждаются в «подстройке» технологических режимов для обеспечения возможно полного извлечения нестабильного конденсата (НК) [10–12].

Основным отличием технологии НТА является использование низкотемпературных абсорберов на конечной ступени выделения конденсата из потока газа вместо низкотемпературных сепараторов [13, 14]. Температурный режим работы низкотемпературного абсорбера обеспечивается за счет дроссель-эффекта, величина которого зависит от давления, перепада давления на дросселе и состава газа, подаваемого в аппарат. Чрезмерно глубокое снижение температуры конечной ступени сепарации нецелесообразно из-за высокой температуры помутнения нестабильного конденсата и образования парафиноотложений, а также значительного увеличения содержания метана и этана в нестабильном конденсате [13].

Повышение эффективности эксплуатации установки промысловой НТА может быть обеспечено в той или иной мере корректировкой термобарических параметров работы установки, совершенствованием массообменных секций абсорберов и/или применением селективного абсорбента [15–21]. Так, в работах [16, 17] предложена новая технология низкотемпературной абсорбции применительно к установке НТА рассматриваемого нефтегазоконденсатного месторождения для углубленного извлечения фракции C_{3+} с использованием селективного абсорбента постоянного состава, получаемого и регенерируемого на специальной установке из нестабильного конденсата первой ступени сепарации, что в промысловых условиях технологически крайне сложно осуществить из-за изменяющегося состава скважинной продукции.

Поэтому после модернизации массообменных секций абсорберов заменой сетчатых тарелок на ре-

гулярные насадки на первый план выходит задача определения области оптимальных значений технологических параметров процесса НТА при подготовке пластовой смеси текущего состава объекта разработки по технологической схеме, представленной на рис. 1. Задача несёт в себе ряд неопределённостей: состав нестабильного конденсата действующим регламентом УКПГ не установлен. Кроме того, конечной товарной продукцией добывающего комплекса в целом является газ (смесь газов сепарации и дегтанизации), подаваемый в магистральный газопровод, и дегтанизованный конденсат, направляемый в конденсатопровод протяженностью несколько сот километров на перерабатывающий завод.

Методика проведения исследования

Режимными параметрами установки НТА являются: давление, температура, расходы и составы входных потоков газа и нестабильного конденсата орошения, поступающих в низкотемпературный абсорбер. Под дегтанизованным газовым конденсатом понимается жидкая фаза, состоящая при рабочих термобарических условиях процесса из углеводородов (УВ) группы C_{3+} . На промысловых установках подготовки газа конденсат такого качества получить не удастся, а из пластового газа получают нестабильный конденсат, состоящий как из УВ группы C_{3+} , так и из более легких УВ – $C_{1,2}$. Поэтому показателями эффективности работы низкотемпературного абсорбера являются: удельный выход нестабильного конденсата, извлечение фракции C_{3+} в нестабильный конденсат и содержание легких углеводородов ($C_{1,2}$) в НК.

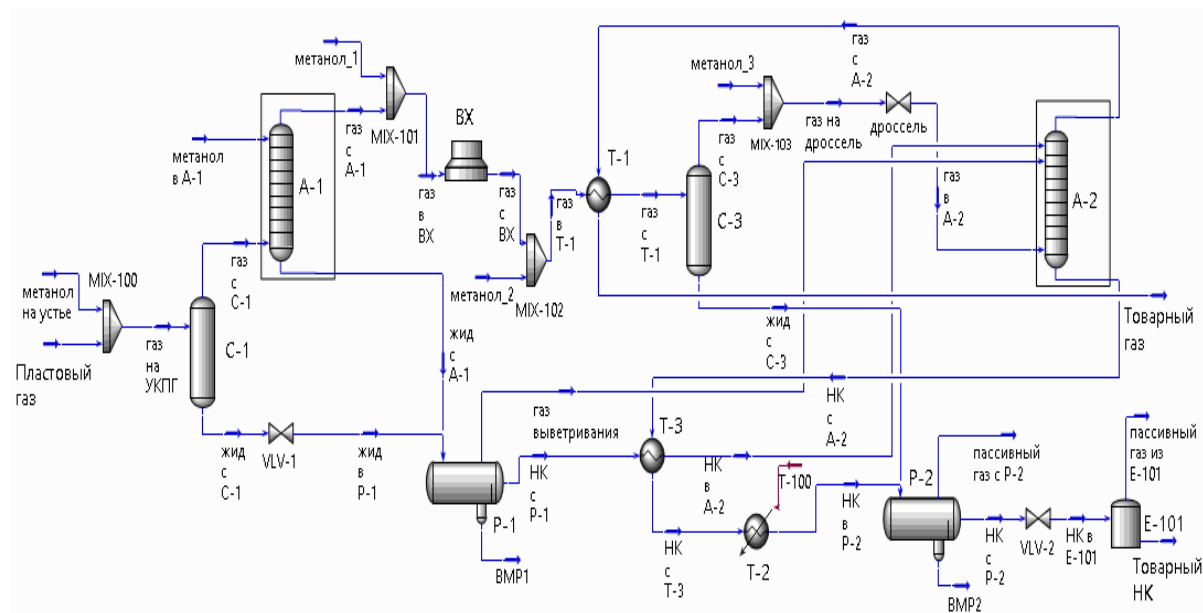


Рис. 1. Модель технологической схемы подготовки сырого газа с процессом НТА в программе «PetroSim»: C-1, C-3 – сепаратор; P-1, P-2 – трёхфазный разделитель; BX – воздушный холодильник; T-1, T-2, T-3 – теплообменник; A-1 – абсорбер; A-2 – низкотемпературный абсорбер; MIX-100, 101, 102, 103 – место ввода метанола; VLV-100, 102 – регулирующий клапан

Fig. 1. Model of the technological scheme of raw gas treatment by low-temperature absorption (LTA) in the program «PetroSim»: C-1, C-3 – separator; P-1, P-2 – 3-phase separator; BX – air cooler; T-1, T-2, T-3 – heat exchanger; A-1 – absorber; A-2 – low-temperature absorber; MIX-100, 101, 102, 103 – methanol injection place; VLV-100, 102 – control valve

Нахождение области оптимальных значений режимных параметров работы установки НТА осуществлялось путем анализа влияния давления, температуры и расходов входных потоков в установку на целевые показатели – выход НК и фракции C_{3+} [22, 23]. Исследование проводилось с помощью программного комплекса технологического моделирования «PetroSim» компании KBC (Yokogawa), в котором была построена модель технологической нитки подготовки газа рассматриваемой установки с использованием модуля процесса НТА (рис. 1).

Симулятор позволяет проводить вычисления составов и теплофизических свойств равновесных фаз различных смесей в цепочке технологических процессов системы «пласт – скважина – коллектор-установка промысловой подготовки углеводородного сырья». Для получения достоверных прогнозных результатов расчета производилась предварительная адаптация модели объекта под имеющиеся промысловые данные в рабочем диапазоне параметров процесса.

На симуляторе расчет всей технологической нитки производился для составов сырого газа, поступающего на обработку в установку, и газа после первой ступени сепарации, направляемого на последнюю ступень сепарации через промежуточную С-3 (рис. 1) в низкотемпературный абсорбер (табл. 1).

Таблица 1. Компонентный состав пластового газа, поступающего на установку комплексной подготовки газа и конденсата (УКПГ), и газа, направляемого в низкотемпературный абсорбер А-2

Table 1. Component composition of the formation gas supplied to the complex gas and condensate treatment plant (CGCTP), and gas entering the low-temperature absorber A-2

Компонент Component	Пластовый газ Formation gas	Газ, поступающий в А-2 Gas entering in the A-2
	% мольные/% molar	
C_1	90,66	91,5453
C_2	4,71	4,5673
C_3	1,83	1,6318
i- C_4	0,34	0,2690
n- C_4	0,44	0,3188
i- C_5	0,20	0,1063
n- C_5	0,14	0,0658
C_6	0,28	0,0608
C_7	0,29	0,0207
C_8	0,27	0,0049
C_9	0,10	0,0004
C_{10+}	0,21	0,0002
N_2	0,15	0,1527
CO_2	0,38	0,3603
Метанол/Methanol	–	0,7029
Содержание C_{5+} в газе, г/м ³ C_{5+} content in gas, g/m ³	63,7	14,71
Содержание C_{3+} в газе, г/м ³ C_{3+} content in gas, g/m ³	123,75	68,27

Также для характеристики материального баланса процесса НТА в табл. 1, 2 представлены компонентные составы газа, поступающего в низкотемператур-

ный абсорбер А-2 из абсорбера А-1, и нестабильного конденсата, направляемого на орошение в абсорбер А-2 с первой ступени сепарации, в зависимости от режима работы разделителя Р-1 в диапазоне давлений 2,0...6,0 МПа при температуре 20 °С.

Таблица 2. Компонентный состав абсорбента – нестабильного конденсата, поступающего на орошение в абсорбер А-2, в зависимости от режима работы трёхфазного разделителя первой ступени Р-1

Table 2. Component composition of the absorbent – unstable condensate entering the absorber A-2 for irrigation, depending on the operating mode of the three-phase separator P-1

Компонент Component	НК на орошение А-2, % массовые/мольные UC for irrigation A-2, % mas/molar									
	Р (МПа)/(MPa)									
	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	
C_1	1,37 8,05	1,81 10,34	2,27 12,64	2,76 14,94	3,27 17,23	3,80 19,52	4,36 21,78	4,94 24,03	5,54 26,26	
C_2	1,34 4,21	1,51 4,62	1,66 4,93	1,78 5,15	1,89 5,32	1,99 5,44	2,07 5,53	2,15 5,59	2,23 5,63	
C_3	2,59 5,56	2,70 5,63	2,78 5,64	2,84 5,61	2,89 5,55	2,93 5,47	2,96 5,38	2,98 5,28	3,00 5,18	
i- C_4	1,25 2,04	1,27 2,01	1,28 1,97	1,29 1,93	1,29 1,88	1,29 1,83	1,29 1,78	1,29 1,73	1,29 1,69	
n- C_4	2,12 3,45	2,14 3,38	2,14 3,30	2,15 3,21	2,14 3,12	2,14 3,04	2,14 2,95	2,13 2,86	2,12 2,78	
i- C_5	2,34 3,07	2,33 2,97	2,32 2,88	2,31 2,78	2,30 2,70	2,28 2,61	2,27 2,52	2,26 2,44	2,24 2,36	
n- C_5	1,93 2,53	1,92 2,45	1,91 2,37	1,90 2,29	1,89 2,22	1,88 2,15	1,87 2,08	1,85 2,01	1,84 1,94	
C_6	9,09 9,96	9,01 9,60	8,94 9,27	8,87 8,95	8,80 8,65	8,74 8,35	8,67 8,07	8,60 7,79	8,53 7,52	
C_7	15,82 14,92	15,68 14,37	15,55 13,87	15,43 13,39	15,31 12,93	15,18 12,49	15,06 12,06	14,94 11,64	14,81 11,23	
C_8	21,13 17,47	20,94 16,83	20,76 16,24	20,59 15,67	20,43 15,13	20,26 14,61	20,10 14,11	19,93 13,62	19,76 13,14	
C_9	9,92 7,30	9,83 7,04	9,74 6,79	9,66 6,55	9,59 6,33	9,51 6,11	9,43 5,90	9,35 5,69	9,27 5,49	
C_{10+}	29,65 16,79	29,38 16,17	29,13 15,60	28,90 15,06	28,66 14,54	28,43 14,04	28,20 13,56	27,96 13,09	27,72 12,63	
CO_2	0,08 0,18	0,10 0,21	0,11 0,23	0,13 0,25	0,14 0,28	0,15 0,28	0,16 0,29	0,17 0,30	0,18 0,31	
Метанол Methanol	1,35 4,45	1,37 4,37	1,38 4,29	1,40 4,21	1,41 4,14	1,42 4,06	1,43 3,98	1,44 3,91	1,45 3,84	

Увеличение давления в разделительной емкости Р-1 с 2,0 до 6,0 МПа приводит к значительному изменению углеводородного состава НК, подаваемого в абсорбер А-2: содержание компонентов C_1 – C_2 в НК возрастает на 19,63 % мольн., или в 2,6 раза, содержание пропана (C_3) остается практически неизменным, а содержание фракций C_4 – C_6 и C_{7+} снижается на 4,66 % мольн., или в 1,3 раза, и на 13,99 % мольн., или также в 1,3 раза, соответственно. Массовые концентрации углеводородных компонентов НК изменяются аналогично. Здесь отметим, что «облегчение» состава НК ведет к снижению его абсорбционной способности [15, 17].

Для анализа работы низкотемпературного абсорбера выбран диапазон давлений 3,0...6,0 МПа. Нижнее значение обусловлено минимальным давлением в межпромысловом коллекторе, а верхнее соответствует максимально возможному давлению в абсорбере А-2 при существующих технологических возможно-

стях. Область изучения влияния температуры процесса ограничивается технологически допустимым минимальным ее значением по ряду причин: высокая температура помутнения нестабильного конденсата – минус 36 °С; значительное увеличение содержания в НК газа дегазации; ограничение по минимально допустимым рабочим температурам материала технологического оборудования (не ниже минус 36 °С). Поэтому для исследования влияние температуры на процесс НТА была выбрана область минус 28... минус 35 °С.

Расход газа ограничен плановыми показателями по добыче газа и количеством рабочих технологических ниток и принят в расчетах постоянным и равным 225 тыс. м³/ч. Подача НК с трехфазного разделителя Р-1 первой ступени сепарации на орошение низкотемпературного абсорбера также постоянна и принята равной 15,6 м³/ч.

Область оптимальной работы технологической нитки установки определялась по результатам изучения влияния каждого из входных параметров потока пластового газа на составы газа сепарации и нестабильного конденсата в процессе НТА в вариантах: без изменения технологической схемы и установки дополнительного оборудования и с минимальной ее модернизацией включением насоса подачи абсорбента с разделительной емкости первой ступени сепарации.

Результаты расчетов

Действующим регламентом в настоящее время установлен режим работы установки НТА: расход газа 225 тыс. м³/ч, давление 3,75 МПа, температура – 30 °С, расход абсорбента 15,6 м³/ч (при плотности НК 640...660 кг/м³ массовый расход составляет 10,0...10,3 т/ч, а удельный расход – 69,3 л/тыс. м³ газа).

Зависимость эффективности сепарации газа и конденсата от термобарических условий процесса НТА

На рис. 2–4 представлены результаты расчетов влияния давления и температуры процесса НТА на удельный выход нестабильного конденсата, удельное извлечение фракции C₃₊ из газа в НК, массовую концентрацию компонентов C₁–C₂ в НК на выходе из абсорбера. Расчеты выполнены для расхода газа 225 тыс. м³/ч при подаче абсорбента 15,6 м³/ч.

Как видно из рис. 2, увеличение удельного выхода конденсата происходит как с ростом давления в НТА, так и при снижении температуры в аппарате, но при этом зависимость извлечения компонентов фракции C₃₊ в нестабильный конденсат от давления характеризуется локальным максимумом при давлении 5,0...5,5 МПа с увеличением выхода этой фракции в НК по мере снижения температуры (рис. 3).

Содержание лёгких компонентов C₁–C₂ в нестабильном конденсате на выходе из низкотемпературного абсорбера монотонно увеличивается как с ростом давления процесса, так и при снижении температуры входного потока газа (рис. 4).

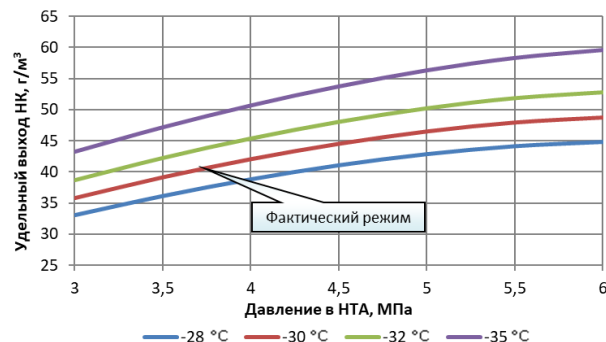


Рис. 2. Зависимость удельного выхода нестабильного конденсата от давления и температуры в низкотемпературном абсорбере

Fig. 2. Dependence of the specific yield of unstable condensate (UC) on pressure and temperature in low-temperature absorber

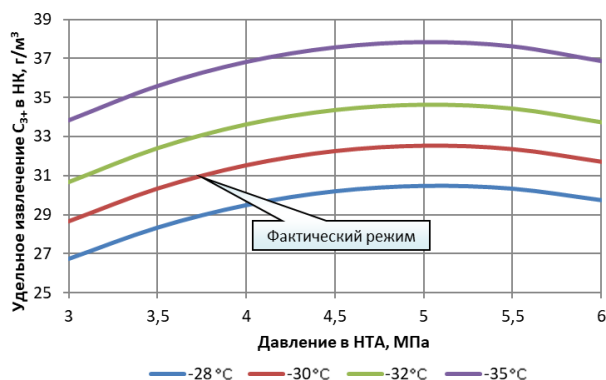


Рис. 3. Зависимость извлечения компонентов группы C₃₊ в нестабильный конденсат от давления и температуры в низкотемпературном абсорбере

Fig. 3. Dependence of components C₃₊ extraction in unstable condensate on pressure and temperature in low-temperature absorber

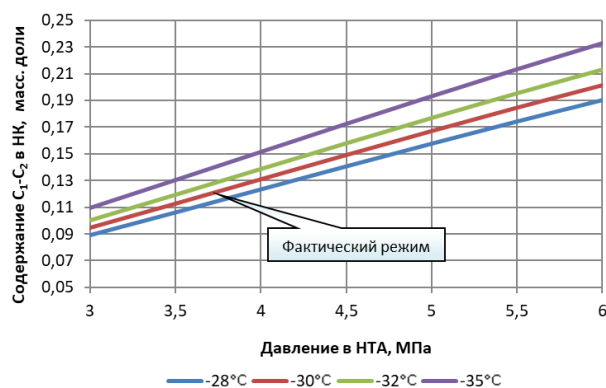


Рис. 4. Зависимость содержания компонентов группы C₁–C₂ в нестабильном конденсате от давления и температуры в низкотемпературном абсорбере

Fig. 4. Dependence of C₁–C₂ components content in unstable condensate on pressure and temperature in low-temperature absorber

Графики зависимостей на рис. 2–4 показывают, что увеличение выхода НК при давлении процесса выше 5 МПа происходит в основном за счет роста содержания в НК углеводородов C₁–C₂, тогда как степень извлечения целевой фракции C₃₊ снижается.

С другой стороны, эффективность процесса НТА характеризуется также содержанием фракций C_{3+} и C_{5+} в товарном газе. На рис. 5, 6 представлены зависимости содержания фракций C_{3+} и C_{5+} в газе сепарации после низкотемпературного абсорбера от термобарических условий в аппарате. Сопоставление зависимостей рис. 3, 6 показывает, что рост извлечения фракции C_{3+} в нестабильный конденсат при увеличении давления до 5,0 МПа в аппарате происходит за счёт компонентов C_3 – C_4 .

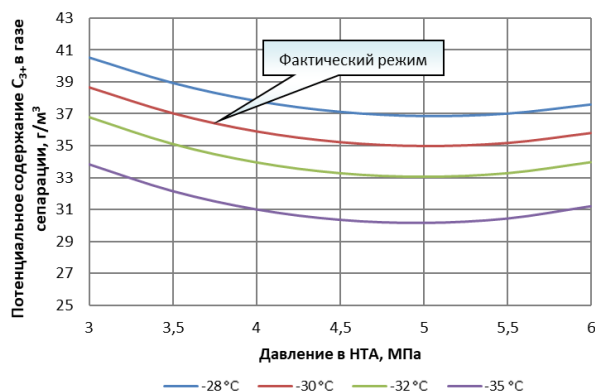


Рис. 5. Зависимость содержания компонентов группы C_{3+} в газе сепарации от давления и температуры в низкотемпературном абсорбере

Fig. 5. Dependence of components C_{3+} content in separation gas on pressure and temperature in low-temperature absorber

Вместе с тем следует иметь в виду, что увеличение давления процесса НТА с 4,0 до 5,0 МПа приводит к незначительному повышению уноса с газом сепарации фракции C_{5+} примерно на $0,2 \text{ г/м}^3$ независимо от температуры в абсорбере А-2 (рис. 6) вследствие некоторого «облегчения» компонентного состава НК, подаваемого на орошение из разделительной емкости первой ступени Р-1 (табл. 2). Поэтому режимы работы низкотемпературного абсорбера с давлением выше 5 МПа существенно снижают технологическую эффективность процесса НТА и не могут быть рекомендованы для практического применения.

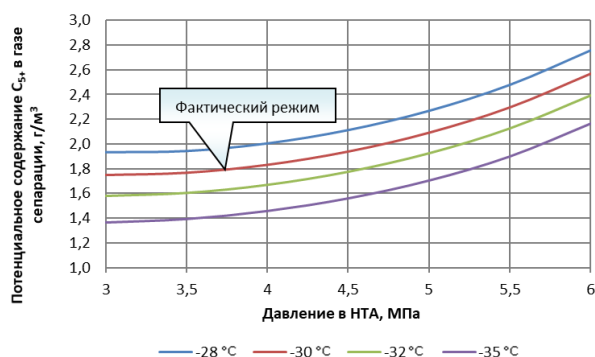


Рис. 6. Зависимость содержания компонентов группы C_{5+} в газе сепарации от давления и температуры в низкотемпературном абсорбере

Fig. 6. Dependence of components C_{5+} content in separation gas on pressure and temperature in low-temperature absorber

Таким образом, оптимальные параметры процесса лежат в интервале значений давления 4,5...5,0 МПа и температуры минус 30... минус 35 °С. Температурный режим работы низкотемпературного абсорбера из-за помутнения конденсата при парафинообразовании технологически ограничен минимально допустимым значением температуры – минус 36 °С.

Зависимость эффективности сепарации газа и конденсата в процессе НТА от расхода газа

При исследовании влияния расхода газа расчеты выполнялись при давлении в аппарате 3,75 МПа, температуре минус 30 °С и подаче абсорбента $15,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Расчеты показали, что при увеличении расхода газа с 200 до 300 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$ наблюдается снижение удельного извлечения целевой фракции C_{3+} на 4,6 % с уменьшением удельного выхода НК на 11,8 %. При этом содержание лёгких «газовых» компонентов в НК с увеличением расхода газа питания в заданном диапазоне возрастает на 5,1 %. Эти закономерности объясняются увеличением скорости газа в аппарате и сокращением времени массообменных процессов в абсорбционной секции. Таким образом, увеличение расхода газа питания ведёт к снижению эффективности процесса НТА.

Влияние расхода нестабильного конденсата орошения на эффективность сепарации газа и конденсата в процессе НТА

Влияние расхода абсорбента – нестабильного конденсата, подаваемого на орошение в абсорбер А-2, на процесс низкотемпературной абсорбции изучалось также при расходе газа 225 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, давлении 3,75 МПа и температуре минус 30 °С в низкотемпературном абсорбере. В результате расчетов получены зависимости, представленные на рис. 7, из которых следует, что увеличивая орошение, можно добиться повышения выхода НК и удельного извлечения фракции C_{3+} в НК при снижении содержания газовых компонентов в нестабильном конденсате.

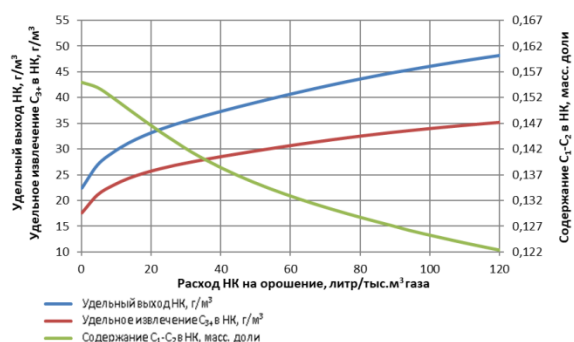


Рис. 7. Зависимости удельного выхода нестабильного конденсата, извлечения компонентов группы C_{3+} в нестабильный конденсат и содержания компонентов C_1 – C_2 в нестабильном конденсате от удельного расхода НК на орошение низкотемпературного абсорбера

Fig. 7. Dependences of the specific yield of unstable condensate, the C_{3+} components extraction into unstable condensate and the C_1 – C_2 components content in unstable condensate on the specific consumption of unstable condensate for irrigation of low-temperature absorber

Важно отметить, что зависимости выхода НК и содержания фракции C_{3+} в НК при расходе абсорбента свыше 40 л/тыс. m^3 имеют характер монотонного роста, но максимальный расход абсорбента технологически ограничен ресурсом НК, выделяющегося на первой ступени сепарации – подачей 25 т/ч при максимальной производительности одной технологической нитки до 400 тыс. m^3 /ч и начальном потенциальном содержании конденсата, поэтому при текущей производительности одной технологической нитки по газу 225 тыс. m^3 /ч обеспечиваемый удельный расход абсорбента не превышает 70...75 л/тыс. m^3 газа. Дальнейшее увеличение удельного расхода НК потребует привлечения его ресурсов из дополнительных источников, что усложнит технологию процесса и управление им. Поэтому возможности повышения выхода фракций C_{3+} и C_{5+} регулированием расхода абсорбента в данном случае весьма ограничены.

Зависимость эффективности сепарации газа и конденсата в процессе НТА от режима работы разделителя Р-1

Как следует из табл. 2, компонентный состав НК, подаваемого на орошение в абсорбер А-2, сильно зависит от давления в разделителе Р-1. Для оценки влияния давления в разделителе первой ступени Р-1 на удельный выход нестабильного конденсата и удельное извлечение компонентов группы C_{3+} в процессе НТА были выполнены расчеты сепарации газа питания (после первой ступени) для двух режимов: фактического режима работы низкотемпературного абсорбера (давление 3,75 МПа, температура минус 30 °С) и оптимального режима его работы (давление в НТА 5 МПа, температура минус 35 °С) при постоянных значениях расхода газа 225 тыс. m^3 /ч и подачи нестабильного конденсата на орошение 15,6 m^3 /ч. Результаты представлены на рис. 8, 9.

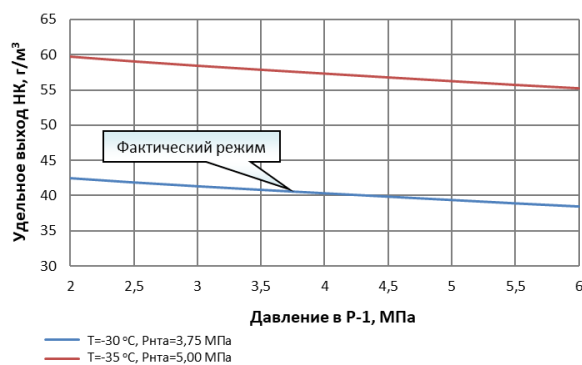


Рис. 8. Зависимость удельного выхода нестабильного конденсата от состава абсорбента, соответствующего давлению в разделителе Р-1, для фактического и оптимального режимов работы абсорбера А-2

Fig. 8. Dependence of the specific yield of unstable condensate on the absorbent composition corresponding to the pressure in the separator Р-1 for actual and optimal operating modes of the absorber А-2

Как видно из рис. 8, 9, наибольший удельный выход конденсата и наибольшее извлечение фракции C_{3+} достигается при компонентном составе абсорбен-

та – НК, соответствующем давлению в разделителе Р-1 2 МПа (табл. 2). Для фактического режима работы абсорбера А-2 применение состава НК орошения, соответствующего давлению в разделителе Р-1 2,0 МПа, по сравнению с НК, состав которого соответствует давлению в разделителе Р-1 3,75 МПа, увеличивает выход НК из абсорбера на 2,04 г/м³ с 40,41 до 42,45 г/м³ (нижняя линия, рис. 8). Для режима работы абсорбера А-2 с абсорбентом, состав которого соответствует давлению в разделителе Р-1 5 МПа, такое увеличение выхода НК составляет уже 3,53 г/м³ (с 56,25 до 59,78 г/м³ – верхняя линия, рис. 8).

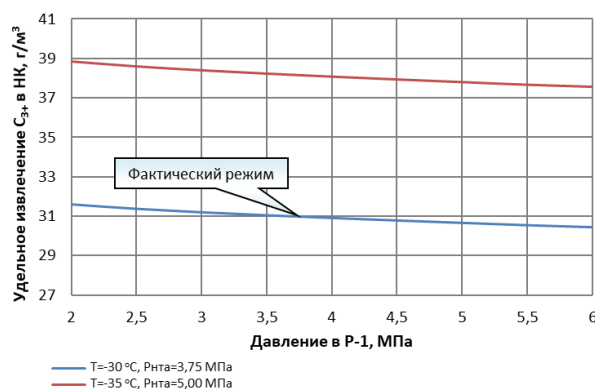


Рис. 9. Зависимость извлечения фракции C_{3+} в нестабильный конденсат от состава абсорбента, соответствующего давлению в разделителе Р-1, для фактического и оптимального режимов работы абсорбера А-2

Fig. 9. Dependence of C_{3+} fraction extraction into unstable condensate on the absorbent composition corresponding to the pressure in the separators Р-1 for actual and optimal operating modes of the absorber А-2

Аналогично смена состава абсорбента – нестабильного конденсата на орошение, соответствующего давлению в разделителе Р-1 3,75 МПа, на состав НК при 2,0 МПа увеличивает извлечение фракции C_{3+} в НК после абсорбера А-2 на 0,62 г/м³ с 30,97 до 31,59 г/м³ при фактических режимных параметрах работы абсорбера А-2 (нижняя линия, рис. 9) и на 1,05 г/м³ (с 37,78 до 38,83 г/м³) при оптимальных (верхняя линия, рис. 9).

Таким образом, перевод работы установки НТА на оптимальный режим работы (давление и температура в абсорбере А-2 5,0 МПа и минус 35 °С соответственно) с подачей на орошение НК компонентного состава, соответствующего давлению в разделителе Р-1 2,0 МПа, позволяет поднять выход НК после абсорбера с 40,41 до 59,78 г/м³, а извлечение фракции C_{3+} в НК – с 30,97 до 38,83 г/м³ и соответственно уменьшить унос компонентов C_{3+} с товарным газом, а также содержание компонентов C_1 – C_2 в НК.

Однако для закачки НК при давлении 2,0 МПа с разделителя Р-1 в абсорбер А-2 с давлением 5,0 МПа необходима минимальная модернизация установки НТА путем врезки насоса с необходимыми характеристиками по производительности (не менее 15,6 m^3 /ч) и напору в технологический трубопровод подачи не-

стабильного конденсата после разделителя Р-1. Она позволит на режиме работы последней ступени сепарации при давлении 5,0 МПа и температуре минус 35 °С повысить извлечение фракции C_{3+} в товарный НК с 30,94 (30,97) до 38,83 г/м³, т. е. на 25,5 %. При этом следует отметить, что изменение компонентного состава абсорбента – НК орошения, слабо повлияло на извлечение фракции C_{5+} в товарный НК и ее унос с товарным газом: содержание этой фракции в товарном газе остаётся на уровне 1,79 г/м³ для фактического режима эксплуатации и 1,64 г/м³ для рекомендуемого режима работы НТА. Таким образом, рост извлечения фракции C_{3+} в товарный НК при смене режима работы абсорбера и компонентного состава абсорбента связан с увеличением доли компонентов C_3 – C_4 в ее составе.

Сравнение эффективности сепарации газа на последней ступени в процессах НТА и НТС

Практический интерес представляет оценка эффективности процесса НТА в сравнении с процессом НТС на последней ступени подготовки газа исследуемого состава. Расчеты процесса НТА и НТС выполнялись, как и в предыдущих случаях, при часовом расходе газа 225 тыс. м³, а процесс НТА рассчитывался при удельном расходе абсорбента состава, соответствующего регламентному режиму работы установки, – 69,3 л/тыс. м³ газа. Результаты расчетов удельных выходов нестабильного конденсата в зависимости от термобарических условий процессов НТА и НТС представлены на рис. 10, из которых следует, что при одинаковых для обоих процессов давлении 3,75 МПа и температуре минус 30 °С выход НК при использовании в качестве последней ступени НТА увеличивается на 20,14 г/м³ сырого газа, т. е. почти в 2 раза по сравнению с использованием на последней ступени НТС.

При этом в процессе НТС унос с газом сепарации фракций C_{5+} и C_{3+} при давлении в сепараторе 3,75 МПа и температуре минус 30 °С остаётся на уровне 4,20 и 49,23 г/м³ соответственно, тогда как в процессе НТА в тех же термобарических условиях – 1,79 и 36,82 г/м³. Степень извлечения фракций C_{5+} и C_{3+} на ступени НТС в товарный НК при этих термобарических условиях составляет 76,3 и 27,9 % соответственно, а на ступени НТА – 87,8 и 46,1 % соответственно; при давлении 5 МПа и температуре минус 35 °С унос фракций C_{5+} и C_{3+} с газом сепарации несколько снижается до 3,48 и 44,99 г/м³ соответственно.

При этих же условиях (5 МПа и минус 35 °С) в процессе НТА остаточное содержание фракций C_{5+} и C_{3+} в газе сепарации составляет 1,70 и 30,17 г/м³ соответственно. Эти результаты подтверждают несомненную эффективность применения на последней ступени сепарации процесса НТА.

В целом результаты расчетов процесса НТА на модели УКПГ месторождения Крайнего Севера с технологией НТА позволили выявить те параметры управления процессом сепарации последней ступени, к которым выходные показатели (извлечение целевой фракции C_{3+} в НК и содержание компонентов C_1 – C_2 в

НК) в конкретных технологических условиях наиболее чувствительны, – это температура, давление в аппарате и состав подаваемого абсорбента.

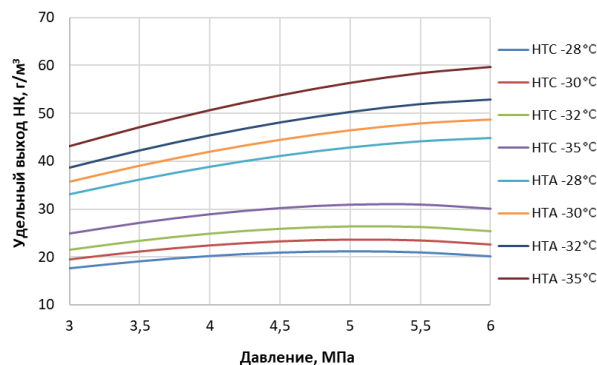


Рис. 10. Зависимости удельного выхода НК от давления и температуры в процессах НТА и НТС

Fig. 10. Dependences of UC specific yield on pressure and temperature in LTA and LTS

Влияние расхода газа на эффективность процесса НТА оказалось относительно слабым, несмотря на широкий диапазон его изменения. Кроме того, на практике возможности регулирования расхода газа питания низкотемпературного абсорбера (газа сепарации первой ступени) в промышленных условиях ограничены текущим планом добычи. Удельный расход абсорбента принимается близким к максимально возможному и ограничен содержанием конденсата в сыром газе и ресурсом НК, выделяемым на первой ступени сепарации. Следовательно, расход газа питания и удельный расход абсорбента (подача НК орошения) не могут рассматриваться в полной мере как инструмент регулирования эффективности процесса НТА.

Заключение

Для решения технологической задачи повышения удельного содержания фракции C_{3+} в товарном нестабильном конденсате после последней ступени промышленной установки подготовки конденсатосодержащего газа смоделированы процессы НТА и НТС. Показано, что использование процесса НТА на последней ступени сепарации для рассматриваемого состава сырого газа обеспечивает выход целевой фракции примерно в 2 раза больше в широком диапазоне давлений и температур по сравнению с процессом НТС. При часовом расходе сырого газа 225 тыс. м³/час оптимизацией термобарических параметров процесса НТА – изменением давления с 3,75 до 5,0 МПа и температуры с минус 30 до минус 35 °С – извлечение фракции C_{3+} в нестабильный товарный конденсат повышается на 6,6 г/м³ сырого газа без модернизации технологической схемы установки, или на 35 т/сутки, с соответствующим сокращением уноса этой фракции с товарным газом.

При таком же изменении режима работы низкотемпературного абсорбера, но с «утяжелением» компонентного состава абсорбента – НК, получаемого в разделителе первой ступени Р-1 при давлении 2,0 МПа, извлечение фракции C_{3+} в нестабильный

товарный конденсат возрастает на $7,9 \text{ г/м}^3$, т. е. еще на $1,3 \text{ г/м}^3$, или 7 т/сутки дополнительно. Но реализация такого режима уже требует минимальной модернизации установки НТА путем врезки насоса в техно-

логический трубопровод подачи нестабильного конденсата орошения с разделителя Р-1 в низкотемпературный абсорбер, которая экспертно вполне оправдана и окупаема в короткие сроки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Campbell J.M. Gas conditioning and processing. V. 2: The equipment modules. 7th ed. – USA: Campbell Petroleum Series, 1992. – 444 p.
2. Mokhtab S., Poe W.A., Mak J.Y. Handbook of natural gas transmission and processing. Principles and Practices. 3rd ed. – Waltham: Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2015. – 597 p.
3. Modeling of liquid separators working as and gas condensate preparation unit in low-temperature separation technology / I. Dolganov, M. Pisarev, E. Ivashkina, I. Dolganova // Petroleum and Coal. – 2015 – V. 57. – P. 328–335.
4. Берлин М.А., Гореченков В.Г., Капранов В.П. Квалифицированная первичная переработка нефтяных и природных углеводородных газов. – Краснодар: Советская Кубань, 2012. – 265 с.
5. Истомин В.А. Низкотемпературные процессы промышленной обработки природных газов. Ч. 2. – М.: ИРЦ Газпром, 1999. – 58 с.
6. Кубанов А.Н. Интенсификация промышленной низкотемпературной обработки природных газов на северных месторождениях: дис. ... канд. тех. наук. – М., 1998. – 111 с.
7. Арнольд К., Стюарт М. Справочник по оборудованию для комплексной подготовки газа. Промысловая подготовка углеводородов / пер. с англ. – М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2009. – 630 с.
8. Особенности технологических процессов промышленной подготовки природного газа с низким конденсатным фактором / А.В. Дунаев, В.А. Истомин, А.Н. Кубанов, В.В. Моисеев, Д.М. Федулов // Газовая промышленность. – 2015. – № 11. – С. 80–83.
9. Современное состояние технологий промышленной подготовки газа газоконденсатных месторождений / А.В. Прокопов, А.Н. Кубанов, В.А. Истомин, Д.М. Федулов, Т.С. Цацулина // Вести газовой науки: Актуальные проблемы добычи газа. – 2015. – № 3. – С. 100–108.
10. Kidnay A.J., Parrish W.R. Fundamentals of natural gas processing. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 464 p.
11. Николаев О.А., Кабанов О.П., Цветков Н.А. Степень извлечения и остаточное содержание углеводородов C_{5+} в газе сепарации газоконденсатных месторождений // НефтеГазХимия. – 2016. – № 2. – С. 64–70.
12. Optimization of the thermobaric conditions of the gas treatment by low-temperature separation / D. Mukhametova, V. Kolchin, V. Kurochkin, R. Ismagilov // Petroleum engineering «Oil and gas fields development». – 2018. – V. 4. – P. 79–88.
13. Специфика промышленной подготовки газов ачимовских залежей / А.В. Прокопов, А.Н. Кубанов, В.А. Истомин, Д.Н. Снежко, А.Н. Чепурнов, А.К. Акопян // Вести газовой науки: Актуальные проблемы добычи газа. – 2018. – № 1. – С. 226–234.
14. Кубанов А.Н., Туревский Е.Н., Шевелев С.А. Опыт эксплуатации технологии ПНТА и перспективы внедрения новых способов извлечения жидких углеводородов // Оценка эффективности научно-технических решений, реализованных на нефтегазодобывающих объектах ОАО «Газпром»: материалы науч.-тех. совета ОАО «Газпром». – М.: ИРЦ Газпром, 1999. – С. 134–143.
15. Прокопов А.В., Истомин В.А. Абсорбционные технологии промышленной подготовки газоконденсатных газов // Вести газовой науки: Актуальные проблемы добычи газа. – 2016. – № 2. – С. 165–173.
16. Прокопов А.В. Совершенствование технологии промышленной подготовки газа газоконденсатных месторождений с высоким конденсатным фактором: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2019. – 120 с.
17. Прокопов А.В., Истомин В.А., Федулов Д.М. Разработка новой технологии низкотемпературной абсорбции для подготовки природного газа газоконденсатных месторождений // Химическая промышленность сегодня. – 2017. – № 6. – С. 37–47.
18. Wang J., Smith R. Synthesis and optimization of low-temperature gas separation processes // Industrial and engineering chemistry research. – 2005. – V. 44. – P. 2856–2870.
19. Прокопов А.В., Истомин В.А., Федулов Д.М. Выделение углеводородов C_{3+} из газоконденсатной смеси при промышленной подготовке пластового флюида // Вести газовой науки: Актуальные проблемы добычи газа. – 2016. – № 4 (28). – С. 202–206.
20. Modes of gas and gas condensate preparation unit in low-temperature separation technology modeling / I. Dolganov, M. Pisarev, E. Ivashkina, I. Dolganova // Petroleum and Coal. – 2014. – V. 56. – P. 182–187.
21. Maddox J.R.N., Bretz K.E. Turbo-expander applications in natural gas processing // Journal of Petroleum Technology. – 1976. – V. 5. – P. 611–613.
22. Методический подход для расчётного исследования процессов промышленной низкотемпературной сепарации с турбодетандерами / М.А. Воронцов, Д.М. Федулов, А.С. Грачев, А.В. Прокопов, В.Ю. Глазунов // Вести газовой науки: Актуальные проблемы добычи газа. – 2016. – № 2 (26). – С. 105–111.
23. Mathematical simulation flow-temperature gas separation / A. Bunaev, I.M. Dolganov, I.O. Dolganova, A. Vladescu // Petroleum and Coal. – 2017. – V. 59. – P. 210–219.

Поступила 22.10.2020 г.

Информация об авторах

Кутуков В.В., студент-магистрант кафедры разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Пономарёв А.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Чеботарёв В.В., кандидат технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDK 622.279.8:66.081.2

EVALUATION OF TEMPERATURE AND PRESSURE CONDITIONS EFFECT ON LOW-TEMPERATURE ABSORPTION EFFECTIVENESS AT GAS TREATMENT ON THE FAR NORTH FIELD

Vladislav V. Kutukov¹,
Kutukov_Vlad@rambler.ru

Alexander I. Ponomarev¹,
pnmrv@mail.ru

Viktor V. Chebotarev¹,
kafedrargkm@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technical University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

Relevance. Gas condensate is a valuable raw material for oil refining and petrochemical production, therefore an increase in the degree of its extraction from gas of the gas condensate fields at field installations is an important scientific and technical problem.

The aim of the study is to substantiate the possibility of increasing the yield of unstable condensate – C_{3+} fraction from the gas stream at operating complex gas and condensate treatment plant of one of the oil and gas condensate fields in the Far North by changing the operating parameters of the low-temperature absorption.

The object: field plant of low-temperature absorption.

Method: simulations of separation and low-temperature absorption in the software package «PetroSim».

Results. The authors have studied the influence of pressure and temperature, gas flow, specific flow rate and composition of the absorbent – unstable condensate, on the efficiency of the gas and condensate preparation at complex gas and condensate treatment plant computer model of low-temperature absorption and low-temperature separation. It is shown that the low-temperature absorption application at the last stage of separation for the considered raw gas composition provides an output of the target C_{3+} fraction approximately two times greater in a wide range of pressures and temperatures compared to the low-temperature separation. The possibility of increasing the degree of the C_{3+} fraction extraction into commercial unstable condensate at the last stage of separation in the low-temperature absorption by 21 % is justified only by optimizing the operating parameters of the unit without changing the technological scheme. At the raw gas flow rate of 225 m³/hour the C_{3+} fraction extraction into unstable commercial condensate increases to 6,6 g/m³ of raw gas without modernization of the technological scheme of the unit, and this is an additional over 35 MT/day C_{3+} fraction with a corresponding reduction in its entrainment with the product gas, by optimization of low-temperature absorption thermobaric parameters (change of pressure from 3,75 to 5,0 MPa and temperature from minus 30 to minus 35 °C). When «weighting» the component composition of the absorbent by reducing the pressure in the unstable condensate separator of the first stage separation the degree of extraction of C_{3+} fraction in the product unstable condensate in the low-temperature absorber increases by 25 %, i. e. 6,6 g/m³, and this is 7 MT/day in addition with a corresponding further reduction of its content in the product gas. However, the implementation of such a regime already requires minimal modernization of the low-temperature absorption unit by inserting a pump into the process pipeline for supplying unstable irrigation condensate from the R-1 separator to a low-temperature absorber, which is repaid in a short time.

Key words:

Gas and condensate field, gas field treatment, low-temperature absorption, computer simulation, temperature and pressure conditions, separation gas, unstable condensate output, selective absorbent, pump.

REFERENCES

1. Campbell J.M. *Gas conditioning and processing. Vol. 2: The equipment modules.* 7th ed. USA, Campbell Petroleum Series, 1992. 444 p.
2. Mokhtab S., Poe W.A., Mak J.Y. *Handbook of natural gas transmission and processing. Principles and Practices.* 3rd ed. Waltham, Gulf Professional Publ. Elsevier, 2015. 597 p.
3. Dolganov I., Pisarev M., Ivashkina E., Dolganova I. Modeling of liquid separators working as and gas condensate preparation unit in low-temperature separation technology. *Petroleum and Coal*, 2015, vol. 57, pp. 328–335.
4. Berlin M.A., Porechenkov V.G., Kapralov V.P. *Kvalifitsirovannaya pervichnaya pererabotka neftyanykh i prirodnnykh uglevodородnykh gazov* [Qualified primary processing of oil and natural hydrocarbon gases]. Krasnodar, Soviet Kuban Publ., 2012. 265 p.
5. Istomin V.A. *Nizkotemperaturnye protsessy promyslovooy obrabotki prirodnnykh gazov.* Ch. 2 [Low-temperature processes of field processing of natural gases. P. 2]. Moscow, IRTS Gazprom Publ., 1999. 58 p.
6. Kubanov A.N. *Intensifikatsiya promyslovooy nizkotemperaturnoy obrabotki prirodnnykh gazov na severnykh mestorozhdeniyakh.* Diss. Kand. nauk [Intensification of field low-temperature treatment of natural gases in the Northern fields. Cand. Diss.]. Moscow, 1998. 111 p.
7. Arnold K., Stiuart M. *Spravochnik po oborudovaniyu dlya kompleksnoy podgotovki gaza. Promyslovaya podgotovka uglevodородov* [Handbook of equipment for complex gas treatment. Field preparation of hydrocarbons]. Moscow, Premium Inzhiniring Publ., 2009. 630 p.
8. Dunaev A.V., Istomin V.A., Kubanov A.N., Moiseev V.V., Fedulov D.M. Features of technological processes of field preparation of natural gas with a low condensate factor. *GAS industry of Russia*, 2015, no. 3, pp. 80–83. In Rus.
9. Prokopov A.V., Kubanov A.N., Istomin V.A., Fedulov D.M., Tsatsulina T.S. State-of-art technologies for gas treatment at gas-condensate fields. *News of gas science*, 2015, no. 3, pp. 100–108. In Rus.
10. Kidnay A.J., Parrish W.R. *Fundamentals of natural gas processing.* Boca Raton, CRC Press, 2006. 464 p.
11. Nikolaev O.A., Kabanov O.P., Tsvetkov N.A. Extent of extraction and the residual content of C5+ hydrocarbons in produced gas of gas-condensate fields. *OIL&GAS CHEMISTRY*, 2016, no. 2, pp. 64–70. In Rus.

12. Mukhametova D., Kolchin V., Kurochkin V., Ismagilov R. Optimization of the thermobaric conditions of the gas treatment by low-temperature separation. *Petroleum engineering «Oil and gas fields development»*, 2018, vol. 4, pp. 79–88.
13. Prokopov A.V., Kubanov A.N., Istomin V.A., Snezhko D.N., Chepurinov A.N., Akopian A.K. Specifics of field gas preparation in Achimov deposits. *News of gas science*, 2018, no. 1, pp. 226–234. In Rus.
14. Kubanov A.N., Turevsky E.N., Shevelev S.A. Opyt ekspluatatsii tekhnologii PNTA i perspektivy vnedreniya novykh sposobov izvlecheniya zhidkikh uglevodorodov [Operating experience of FLTA technology and possibility for introducing new methods for extracting liquid hydrocarbons]. *Otsenka effektivnosti nauchno-tekhnicheskikh resheniy, realizovannykh na neftegazodobyvayushchikh obektakh OAO «Gazprom». Materialy nauchno-tekhnicheskogo soveta OAO «Gazprom»* [Evaluating the effectiveness of scientific and technical solutions implemented at JSC «Gazprom» oil and gas production facilities. Materials of the scientific and technical council of Open joint stock company «Gazprom»]. Moscow, Information and advertising Center Gazprom, 1999, pp. 134–143.
15. Prokopov A.V., Istomin V. A. Absorption techniques for field preparation of wet gases. *News of gas science*, 2016, no. 2, pp. 165–173. In Rus.
16. Prokopov A.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii promyslovy podgotovki gaza gazokondensatnykh mestorozhdeniy s vysokim kondensatnym faktorom*. Dis. Kand. nauk [Improving the technology of field treatment of gas from gas condensate fields with a high condensate factor. Cand. Diss.]. Moscow, 2019. 120 p.
17. Prokopov A.V., Istomin V.A., Fedulov D.M. Development of new low-temperature absorption technologies for the treatment of natural gas from gas condensate fields. *Chemical industry today*, 2017, no. 6, pp. 37–47. In Rus.
18. Wang J., Smith R. Synthesis and optimization of low-temperature gas separation processes. *Industrial and engineering chemistry research*, 2005, vol. 44, pp. 2856–2870.
19. Prokopov A.V., Istomin V.A., Fedulov D.M. Separation of C_3+ hydrocarbons from gas-condensate mixture during field treatment of reservoir fluid. *News of gas science*, 2016, no. 4, pp. 202–206. In Rus.
20. Dolganov I., Pisarev M., Ivashkina E., Dolganova I. Modes of gas and gas condensate preparation unit in low-temperature separation technology modeling. *Petroleum and Coal*, 2014, vol. 56, pp. 182–187.
21. Maddox J.R.N., Bretz K.E. Turbo-expander applications in natural gas processing. *Journal of Petroleum Technology*, 1976, no. 5, pp. 611–613.
22. Vorontsov M.A., Fedulov D.M., Grachev A.S., Prokopov A.V., Glazunov V.Yu. Methodical approach for the calculated research processes of field low-temperature separation with turbo-expanders. *News of gas science*, 2016, no. 2, pp. 105–111. In Rus.
23. Bunaev A., Dolganov I. M., Dolganova I. O., Vladescu A. Mathematical simulation of low-temperature gas separation. *Petroleum and Coal*, 2017, vol. 59, pp. 210–219.

Received: 22 October 2020.

Information about the authors

Vladislav V. Kutukov, master student, Ufa State Petroleum Technical University.

Alexander I. Ponomarev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

Viktor V. Chebotarev, Cand. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

УДК 556.550.845 (292.511/.516)

ПЕРВЫЕ ИЗОТОПНО-ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПО ПРИРОДНЫМ ВОДАМ ЮГО-ВОСТОЧНОГО СКЛОНА КРЯЖА ЧЕКАНОВСКОГО (АРКТИЧЕСКИЕ РАЙОНЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)

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

Максимова Анастасия Алексеевна²,
rock.nastaya64@gmail.com

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

Ян Петр Александрович^{1,2},
YanPA@ipgg.sbras.ru

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

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

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

Актуальность исследования обусловлена получением материалов по неизученным ранее природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского (арктические районы Сибирской платформы). Исследуемый район относится к труднодоступным, со сплошным распространением многолетнемерзлых пород.

Цель: выявить геохимические особенности природных вод юго-восточного склона кряжа Чекановского.

Методы. Полевое опробование проведено в соответствии с общепринятыми методиками. Химико-аналитические исследования выполнены методами титриметрии, ионной хроматографии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Анализ изотопных отношений δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$ проводился на приборе Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженном приставками пробоподготовки H/Device (для анализа отношений δD) и GasBench II (для анализа отношений $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C_{DIC}$). При анализе гидрогеохимической информации использовались коэффициенты: геохимические (Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, rNa/rCl и SO₄/Cl), концентрации и водной миграции по А.И. Перельману.

Результаты. Представлены первые результаты изотопно-геохимических исследований природных вод юго-восточного склона кряжа Чекановского, расположенного в низовьях реки Лены, в арктических районах Сибирской платформы. Изучены реки и временные водотоки, образующиеся в период таяния многолетнемерзлых пород. Установлено, что воды ультрапресные с величиной общей минерализации от 63 до 100 мг/дм³, по показателю pH (6,9–7,9) нейтральные и слабощелочные. Характеризуются показателем химического потребления кислорода от 1,6 до 9,7 мгО/дм³. Речные воды имеют преимущественно гидрокарбонатный кальциевый состав. Временные водотоки отличаются преобладанием сульфат-иона, а также низкими значениями ХПК от 1,6 до 3,1 мгО/дм³. Рассчитанные коэффициенты водной миграции распределились следующим образом: очень сильная интенсивность миграции I, Se, Br; сильная Sr, B, Sb; средняя As, P, Ni, Cu, Li, Ba, Zn, U, Sn, Mo; слабая (инертная) Sc, Y, Be, Mn, Pb, Si, Ge, Cr, Rb, Co, V, Fe, Ga, Th, Al, Zr, Ti. Изотопные отношения кислорода и водорода изучаемых вод варьируют в широком диапазоне для $\delta^{18}O$: от –24,2 до –19,5 ‰, и для δD – от –183,0 до –149,3 ‰. По изотопному составу воды имеют метеорное происхождение. Наблюдается смещение акцента питания вод от зимнего к летнему для рек, в то время как для временных водотоков в большей степени проявляются зимние (снеговые) источники. Изотопные отношения $\delta^{13}C_{DIC}$ варьируют от –9,7 до –7,2 ‰. В речных водах наблюдаются как положительные (до –7,2 ‰), так и отрицательные (до –9,7 ‰) отклонения $\delta^{13}C_{DIC}$ относительно проб, отобранных из временных водотоков. Для них характерны значения от –8,0 до –7,7 ‰. Можно предположить, что обогащение углекислотой и изотопом ¹³C_{DIC} происходит, в первую очередь, за счет карбонатных пород и углекислоты, образованной в ходе вегетации растений типа С₄.

Ключевые слова:

Природные воды, химический состав, стабильные изотопы $\delta^{18}O$, δD , $\delta^{13}C$, многолетнемерзлые породы, интенсивность водной миграции элементов, юго-восточный склон кряжа Чекановского, Сибирская платформа, Арктика.

Введение

Лена является одной из крупнейших рек России, которая протекает от юга Сибирской платформы и впадает в море Лаптевых, образуя крупную дельту. Река является источником хозяйственно-питьевого водоснабжения девяти административных районов Республики Саха (Якутия) и ее столицы – г. Якутска с населением более

230 тысяч человек. В научной литературе отсутствуют сведения о изотопном составе природных вод ее бассейна, что является крайне важной проблематикой при изучении крупнейших рек Сибирской Арктики, чьи водосборы подстилаются многолетнемерзлыми породами. В настоящее время антропогенная нагрузка на нее значительно возрастает, что связано с активным освоением природных

ресурсов. Источниками загрязнения выступают промышленно-бытовые отходы населенных пунктов, нефтяных промыслов и предприятий алмазо- и золотодобывающей промышленности. Целью настоящего исследования является получение актуальных сведений о химическом и изотопном составе природных вод ее бассейна, которые будут положены в основу оценки экологического состояния и качества вод для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения населения. Дальнейшие работы будут связаны с изучением процессов формирования их состава, что сопряжено с получением (накоплением) нового фактического материала на единой методической основе по природным водам и горным породам.

Объект и методика исследований

Административно район работ площадью около 40 км² располагается на территории Булунского улуса Республики Саха (Якутия) и приурочен к юго-восточному склону кряжа Чекановского, вдоль левого берега р. Лена между устьями рек Буотар и Атыркан на расстоянии от 10 до 24 км вниз по течению от поселка Чекуровка (рис. 1). Бассейны рек Буотар и Атыркан расположены в условиях преимущественно денудационно-эрозионного северо-тундрового ландшафта, представленного холмистым, реже грядовувалистыми плато с нагорными террасами, курумами, мерзлотно-солифлюкционными формами. Исследуемая территория относится к Северной субарктической криогенной области [1] Мощность многолетнемерзлых пород превышает 400 м при средней температуре ниже –9°. Сезонно-талый слой варьирует от 0,5 до 1,5 м. Четвертичные отложения представлены главным образом нерасчлененными делювиальными образованиями с участием солифлюксия, коллювия и элювия. Под ними залегают меловые валанжинские глинисто-терригенные, готерив-барремские и аптские угленосные алевритно-песчаные, в меньшей степени средне-верхнеюрские алевритно-песчаные отложения. В непосредственной близости к юго-западу от изученных объектов располагается Экицкий прогнозируемый золото-алмазный рассыпной узел [2].

В период с 21 июля по 1 августа 2019 г. в ходе работ полевого отряда «Чекуровский» ИНГТ СО РАН под руководством О.С. Урман на обнажениях в нижнем течении р. Лена были отобраны шесть проб природных вод. Полевое опробование из устьев рек Буотар, Атыркан, Непелях и сезонных водотоков проведено в соответствии с общепринятыми методиками.

Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП), проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ (аналитики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. Ракул).

Анализ комплекса изотопных отношений δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) проводился в центре коллективного пользования Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН с по-

мощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для анализа отношений δD) и GasBench II (для анализа отношений $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C_{DIC}$). Изотопные отношения $\delta^{13}C_{DIC}$, δD и $\delta^{18}O$ измерялись относительно мировых стандартов: VSMOW2; SLAP2; GISP – для анализа изотопных отношений водорода и кислорода; NBS-18; NBS-19 – для анализа $\delta^{13}C_{DIC}$. Ошибка определения изотопного состава стандартов по углероду и кислороду – не более 0,1 ‰, по водороду – не более 2 ‰.

Результаты исследований и обсуждение

Особенности геохимии природных вод

Воды изучаемого региона (рек и временных водотоков) ультрапресные с величиной общей минерализации, варьирующей от 63 до 100 мг/дм³, нейтральные и слабощелочные (pH 6,6–7,9), характеризуются показателем химического потребления кислорода (ХПК) от 1,6 до 9,7 мгО/дм³, содержанием кремния от 0,6 до 1,3 мг/дм³ и с преобладанием в составе гидрокарбонат-иона (до 58 мг/дм³) и кальция (до 19 мг/дм³) (табл. 1). Отличительными чертами временных водотоков являются: преобладание в их составе сульфат-иона до 36 мг/дм³ в водопаде № 1 (№ 3), 27 мг/дм³ – в водопаде № 2 (№ 4) и до 24 мг/дм³ в водопаде (косой распадок) (№ 5), а также низкие значения ХПК (1,6–3,1 мгО/дм³), которые показывают количество кислорода, необходимое для химического окисления органических соединений. Так, воды р. Непелях (№ 2, рис. 1) имеют SO₄-HCO₃ Na-Ca состав с величиной общей минерализации 83 мг/дм³, нейтральным pH=7,5 и содержанием Si 1,1 мг/дм³. В них выявлены низкие концентрации SO₄²⁻ и Mg²⁺, не превышающие 7,8 и 1,2 мг/дм³ соответственно, а также максимальные – Cl⁻ до 3,4 мг/дм³ и Na⁺ до 3,0 мг/дм³. Воды водопада № 1 (№ 3, рис. 1) характеризуются HCO₃-SO₄ Mg-Ca химическим типом с величиной общей минерализации 93 мг/дм³, pH 7,3, ХПК 1,6 мгО/дм³ и содержанием Si 1,2 мг/дм³. Отмечаются максимальные содержания SO₄²⁻ (35,9 мг/дм³) и минимальные Cl⁻ (0,4 мг/дм³) и Na⁺ (1,4 мг/дм³). В водах водопада (косой распадок) (№ 5, рис. 1) с HCO₃-SO₄ Na-Mg-Ca составом отличаются величиной общей минерализации (63 мг/дм³), более низким pH 6,9, ХПК 3,1 мгО/дм³ и концентрациями Si 0,6 мг/дм³. В данном водопункте выявлены минимальные концентрации гидрокарбонат-иона (19 мг/дм³) и Ca²⁺ (12 мг/дм³), повышенные концентрации SO₄²⁻ (24 мг/дм³) и Cl⁻ (2,4 мг/дм³). Анализ имеющихся данных выявил общие геохимические черты вод р. Буотар (№ 1), водопада № 2 (№ 4) и р. Атыркан (№ 6). Они имеют SO₄-HCO₃ Mg-Ca состав с величиной общей минерализации от 97 до 100 мг/дм³, характеризуются слабощелочными pH (7,6–7,9), ХПК 9,7 мгО/дм³ и содержаниями Si от 0,9 до 1,3 мг/дм³. Для сравнения, воды протекающей к западу от изучаемой территории р. Оленек характеризуются SO₄-HCO₃ Ca составом с величиной общей минерализации от 5,6 до 11,6 мг/дм³, pH от нейтральных до слабощелочных (7,5–8,2), и O₂раств. от 8,9 до 11 мг/дм³ [3].



Рис. 1. Местоположение района исследований. Нерасчлененные образования: 1 – элювий: дресвяники щебнистые, дресвяники глыбовые (до 3 м), 2 – элювий и делювий: супеси, суглинки со щебнем и дресвой (1–3 м), 3 – коллювий: щебни глыбовые (до 8 м), 4 – делювий и коллювий: щебни глыбовые, щебни дресвяные, суглинки (до 20 м), 5 – делювий и солифлюксий: щебни с песчано-глинистым заполнением (до 20 м); 6 – сартанский горизонт – голоцен, нижняя часть, аллювий первой надпойменной террасы: галечники, пески, супеси, суглинки, линзы торфа, клинья льда (до 16 м); 7 – аллювий русла, поймы и первой надпойменной террасы: пески, галечники, алевролиты, суглинки, супеси, глины, торф (до 15 м) (вмещают малые россыпные месторождения и штиховые ореолы золота); 8 – едомная свита, лессовидные криогенные полигенетические образования: супеси, суглинки, алевролиты, пески, линзы торфа, ископаемые льды (более 35 м); 9 – казанцевский горизонт, аллювий третьей надпойменной террасы: галечники, супеси, пески, гравийники (до 8 м); 10 – бестяхская свита, аллювий одноименной террасы: галечники, гравийники, пески (до 14 м) (вмещают штиховые ореолы золота); 11 – тустахская свита, аллювий одноименной террасы: галечник, гравийники (до 2,5 м) (вмещают штиховые ореолы золота); 12 – черендейская свита, аллювий одноименной террасы: галечники глинистые и песчаные, супеси (до 4 м); 13 – дочетвертичные образования, не разделенные по типу пород; 14 – объекты изучения; 15 – тектонические уступы по разрывным нарушениям, активным в четвертичное время; 16 – гряды; 17 – эрозионные уступы; 18 – структурно-денудационные останцы, не выражающиеся в масштабе карты; места находок ископаемых остатков: 19 – спор и пыльцы; 20 – позвоночных

Fig. 1. Location of the study area. Poorly defined formations: 1 – eluvium: arenas schistose, arenas block (less than 3 m), 2 – eluvium and deluvium: sands loam, mild clays with break stone and landwaste (1–3 m), 3 – colluvium: break stone block (less than 8 m), 4 – deluvium and colluvium: break stone block, break stone rotten stone, mild clay (less than 20 m), 5 – deluvium and solifluksium: break stone with sand-clay filling (less than 20 m); 6 – sartanskiy horizon – Holocene, low part: alluvium first underfloodplain terrace: bench gravel, sands, sand loam, mild clay, peat lenses, ice wedges (less than 16 m); 7 – alluvium of channel, floodplain and the first underfloodplain terrace: sands, bench gravel, aleurolite, mild clay, sand loam, clays, peat (less than 15 m) (accommodate small alluvial deposits and schlichow gold halos); 8 – yedomnaya formation, loessoid cryogenic polygenetic formations: mild clay, sand loam, aleurolite, sands, peat lenses, fossil ice (above 35 m); 9 – kazantsevsky horizon, alluvium of the third underfloodplain terrace: pebbles, sandy loam, sand, gravel (less than 8 m); 10 – bestyakhskaya formation, alluvium of the same name terrace: pebbles, gravels, sands (less than 14 m) (accommodate concentrate halos of gold); 11 – tustakhskaya formation, alluvium of the same name terrace: pebble, gravel (less than 2,5 m) (accommodate concentrate halos of gold); 12 – cherendeyskaya formation, alluvium of the same name terrace: clay pebbles and sand loam (less than 4 m); 13 – pre-Quaternary formation, of unseparated type of rocks; 14 – objects of study; 15 – tectonic ledges separated by breaking fault, active in the Quaternary; 16 – ridge; 17 – erosion ledges; 18 – structural-denudation relics, not expressed in the map scale; places of fossil finds: 19 – spore and pollen; 20 – vertebrates

Рассчитанные геохимические коэффициенты показали, что воды временных водотоков № 1 и 2 отличаются высоким отношением SO_4/Cl (46–83). Предположительно это связано с дренированием массива пород с наличием сульфидной минерализации. О преобладании во вмещающих породах кальциевых минералов говорит отношение Ca/Si , которое возрастает от 14 до 20 по гидрогеохимическому профилю от водопункта № 1 к № 6. По другим геохимическим коэффициентам (Ca/Na , Ca/Mg , Mg/Si , Na/Si , Si/Na , rNa/Cl) не удалось выявить значимых различий (табл. 2).

Спектр распределения элементов изученных вод (рис. 2, а) выявил наибольшие содержания у Si ($1,27 \text{ мг/дм}^3$), Al ($0,04 \text{ мг/дм}^3$), Fe ($0,06 \text{ мг/дм}^3$) и Sr ($1,15 \text{ мг/дм}^3$). С ростом общей минерализации увеличиваются концентрации B, Si, Sc, V, Cr, Mn, Co, Cu,

Zn, Ga, As, Se, Br, Rb, Y, Sn, Ba, Pb, Th, U и снижаются содержания Ti, Al, Fe, Ni, Ge, Sr, Sb, I. Среди изученных водопунктов воды реки Непелях (№ 2) характеризуются минимальными содержания Pb до $9 \cdot 10^{-6}$ и Th до $2 \cdot 10^{-6} \text{ мг/дм}^3$. В водопаде № 1 (№ 3) выявлены повышенные содержания Zn ($0,001 \text{ мг/дм}^3$), а во временном водотоке № 2 (№ 4) установлены минимальные содержания Mn ($0,0003 \text{ мг/дм}^3$), Ti ($0,0002 \text{ мг/дм}^3$), V ($9 \cdot 10^{-6} \text{ мг/дм}^3$) и максимальные концентрации Br ($0,013 \text{ мг/дм}^3$), Mo ($0,0003 \text{ мг/дм}^3$) и Zn ($0,002 \text{ мг/дм}^3$). В водопаде (косой распадок) (№ 5) выявлены максимально высокие на изучаемой территории содержания Ni ($0,003 \text{ мг/дм}^3$) и I ($0,071 \text{ мг/дм}^3$). Воды реки Атырган (№ 6) характеризуются пониженными концентрациями Th ($3 \cdot 10^{-6} \text{ мг/дм}^3$), а также максимальными содержаниями Zn ($0,003 \text{ мг/дм}^3$) и Mn ($0,01 \text{ мг/дм}^3$).

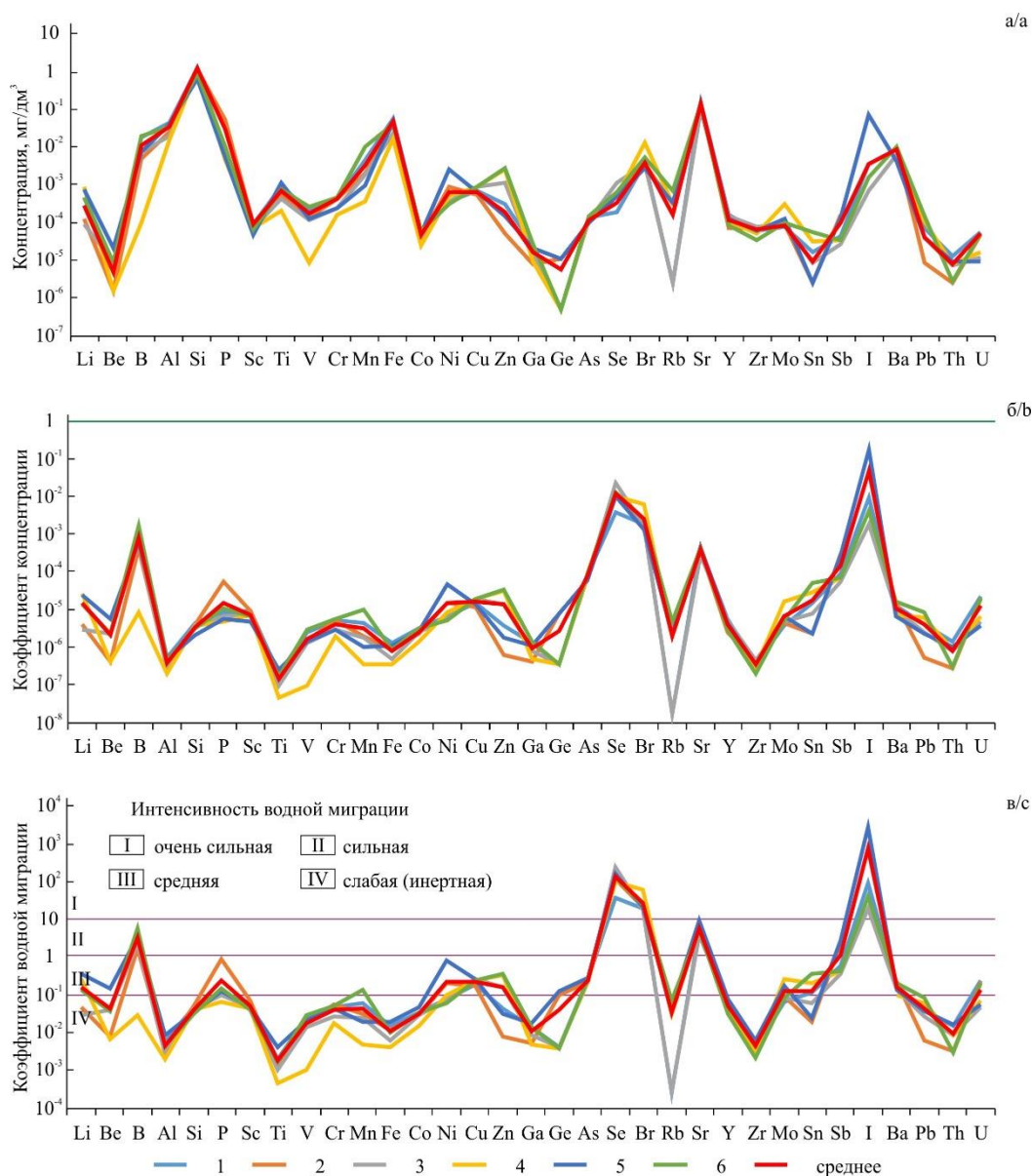


Рис. 2. Спектр распределения микрокомпонентов в природных водах юго-восточного склона кряжа Чекановского (а), распределение коэффициентов концентраций (б), ряды миграции микрокомпонентов в природных водах (в)

Fig. 2. Spectrum of trace elements distribution in natural waters of south-east slope of the Chekanovsky ridge (a), distribution of concentration factors (b), microelements migration series in natural waters (c)

Для оценки степени накопления в водах химических элементов были рассчитаны коэффициенты концентрации, которые отражают отношение содержаний элементов в воде к вмещающим породам или к кларку литосферы. Их анализ выявил следующий ряд (рис. 2, б):

$I(5 \cdot 10^{-2}) > Se(1 \cdot 10^{-2}) > Br(2 \cdot 10^{-3}) > B(8 \cdot 10^{-4}) > Sr(4 \cdot 10^{-4}) > Sb(1 \cdot 10^{-4}) > As(7 \cdot 10^{-5}) > Sn(2 \cdot 10^{-5}) > Cu(2 \cdot 10^{-5}) > P(1 \cdot 10^{-5}) > Ni(1 \cdot 10^{-5}) > Li(1 \cdot 10^{-5}) > Zn(1 \cdot 10^{-5}) > U(1 \cdot 10^{-5}) > Ba(1 \cdot 10^{-5}) > Sc(7 \cdot 10^{-6}) > Mo(7 \cdot 10^{-6}) > Pb(4 \cdot 10^{-6}) > Y(4 \cdot 10^{-6}) > Cr(4 \cdot 10^{-6}) > Si(3 \cdot 10^{-6}) > Mn(3 \cdot 10^{-6}) > Ge(3 \cdot 10^{-6}) > Co(2 \cdot 10^{-6}) > Be(2 \cdot 10^{-6}) > Rb(2 \cdot 10^{-6}) > V(2 \cdot 10^{-6}) > Ga(9 \cdot 10^{-7}) > Fe(8 \cdot 10^{-7}) > Th(8 \cdot 10^{-7}) > Al(4 \cdot 10^{-7}) > Zr(3 \cdot 10^{-7}) > Ti(1 \cdot 10^{-7})$.

Чтобы оценить интенсивность водной миграции, которая определяется свойствами элемента, а также показывает степень его концентрирования или рассеяния в природных водах, были рассчитаны коэффициенты по А.И. Перельману [4]: $Kx_1 = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$, где m_x – содержание элемента в воде (мг/дм³), a – минерализация (мг/дм³) и n_x – кларк литосферы в % или содержание того же элемента во вмещающей породе. При расчетах были использованы кларки литосферы [5]. По интенсивности водной миграции химические элементы выстроились в следующую последовательность (рис. 2, в):

очень сильная $I_{741} > Se_{132} > Br_{27} > сильная > Sr_6 > B_3 > Sb_{1,14} > средняя > As_{0,25} > P_{0,24} > Ni_{0,23} > Cu_{0,22} > Li_{0,16} > Ba_{0,16} > Zn_{0,16} > U_{0,14} > Sn_{0,13} > Mo_{0,12} > слабая(инертная) > Sc_{0,050} > Y_{0,050} > Be_{0,045} > Mn_{0,045} > Pb_{0,043} > Si_{0,041} > Ge_{0,040} > Cr_{0,040} > Rb_{0,032} > Co_{0,031} > V_{0,018} > Fe_{0,011} > Ga_{0,011} > Th_{0,0090} > Al_{0,0046} > Zr_{0,0043} > Ti_{0,0018}$.

Некоторые элементы из установленных А.И. Перельманом рядов миграции переходят из своих привычных групп в другие, например, Se из легкоподвижной группы переходит в высокоподвижную, а Mn и Co из подвижной группы переходит в инертную. В случае с селеном такой переход связан с большим антропогенным влиянием на поверхностные воды.

Изотопный состав природных вод

Стабильные изотопы водорода, кислорода и углерода природных вод позволяют изучать их историю прямыми методами. Применение комплекса изотопных отношений $[\delta^{13}C + \delta^{18}O + \delta D]$ достоверно выявляет генезис вод [6], степень их испарения [7] и связь между водоносными горизонтами в пределах площади водосбора [8, 9], взаимодействие вод с дневной поверхностью [10] и вмещающими горными породами [11, 12], а также роль антропогенных факторов в их загрязнении [13].

Связь отношений $\delta^{18}O$ и δD активно используется при построениях локальных линий метеорных вод (Local Meteoric Water Line – LMWL) [9, 10, 12, 13], отражающих соотношение между $\delta^{18}O$ и δD в указанном регионе. Аналогичная линия, охватывающая глобальное среднегодовое отношение между δD и $\delta^{18}O$ для природных метеорных вод (Global Meteoric Water Line – GMWL), была предложена Г. Крейгом [14] и описывается уравнением $\delta D = 8,0 \cdot \delta^{18}O + 10$. Локальные линии в большинстве случаев соотносят с GMWL. Это позволяет делать выводы об условиях осадконакопления в изучаемом регионе, эффектах темпера-

турного режима и сезонности осадков, степени испарения вод, оказывающих существенное влияние как на соотношения между парой $\delta^{18}O$ и δD , так и на сами отношения стабильных изотопов.

На рис. 3, а и в табл. 2 представлены данные по соотношениям стабильных изотопов $\delta^{18}O$ и δD природных вод, отобранных в реках и временных потоках (рис. 1). Изотопные отношения кислорода и водорода вод находятся в широком диапазоне: от –24,2 до –19,5 ‰ для $\delta^{18}O$ и от –183,0 до –149,3 ‰ для δD . Из рис. 3, а видно, что изотопные отношения водорода и кислорода для всех изученных вод хорошо коррелируют с GMWL (точки расположены близко к GMWL), что позволяет отнести их к метеорным. Воды исследованной области можно разделить на две группы: первая – воды, для которых $\delta^{18}O$ и δD точно повторяют глобальную линию метеорных вод, и вторая – воды, для которых $\delta^{18}O$ и δD отклоняются от GMWL (хоть и не значительно) в сторону более тяжелого изотопного состава кислорода. Интересно отметить, что положительный сдвиг изотопного состава кислорода (от 0,5 до 0,7 ‰) характерен для рек, в то время как во временных водотоках отмечается близость изотопных отношений $\delta^{18}O$ и δD к GMWL.

Обеднение изотопного состава вод легким изотопом кислорода, как правило, объясняется эффектом испарения вод [8, 9, 15, 16]. Считается [17], что наиболее сильно он проявляется в верхних слоях поверхностных вод (глубины до 1 м), где обеднение легким изотопом кислорода может достигать 4 ‰. Учитывая более длинный «маршрут» следования речных вод и большую удельную поверхность контакта с атмосферой, эффект испарения в них проявлен в большей мере. В сравнении с водами временных водотоков для рек характерны более тяжелые изотопные соотношения как водорода, так и кислорода. Это указывает на различие питания этих объектов. Обогащение легким изотопом характерно для осадков холодного времени года [10]. В этой связи питание временных водотоков осуществляется в зимний период года, а рек дополняется осадками теплого сезона.

Не меньший интерес исследователей привлекает изотопный состав растворенного в водах неорганического углерода ($\delta^{13}C_{DIC}$) [18–21]. Значения отношений $\delta^{13}C_{DIC}$ позволяют оценить «наследственность» вод, определить уровень взаимодействия вод с окружением, типы окружения. Поскольку потенциальным источником гидрокарбонат-иона в природных водах может служить достаточно обширный спектр соединений, при интерпретации результатов исследования изотопных отношений углерода в углекислоте вод следует учитывать множество факторов. Самыми распространенными «донорами» растворенной в воде углекислоты считается атмосферный диоксид углерода [19], биогенная (органическая) углекислота, которая образуется в ходе жизнедеятельности растений и микроорганизмов [20], карбонатные осадочные породы, почвенный CO_2 , а также гидрокарбонат-ион, образуемый при гидролизе алюмосиликатов. В областях, подверженных антропогенному влиянию, следует также учитывать и техногенные источники [18].

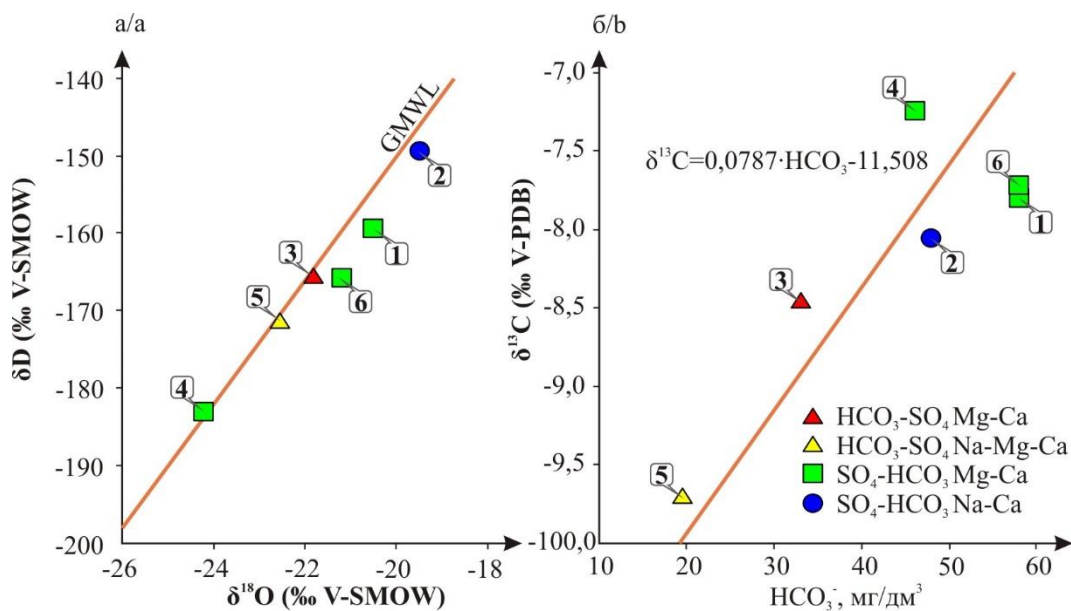


Рис. 3. Изотопные отношения δD и $\delta^{18}O$ природных вод юго-восточного склона кряжа Чекановского (а): р. Буотар (1), р. Непелях (2), р. Атыркан (6); водопад № 1 (3), водопад № 2 (4); водопад (косой распадок) (5). Зависимость изотопного отношения $\delta^{13}C_{DIC}$ вод от концентрации гидрокарбонат-иона (б)

Fig. 3. Isotope ratios δD and $\delta^{18}O$ of natural waters of south-east slope of the Chekanovsky ridge (a): r. Buotar (1), r. Nepelyakh (2), r. Atyrkan (6); waterfall no. 1 (3), waterfall no. 2 (4); waterfall (oblique decay) (5). Dependence of water isotopic ratio $\delta^{13}C_{DIC}$ on HCO_3^- concentration (b)

Воды исследованной области имеют узкое распределение изотопных отношений растворенной углекислоты. Изотопные отношения $\delta^{13}C_{DIC}$ варьируют от $-9,7$ до $-7,2$ ‰. Для временных водотоков (№ 1, 2 и 6) значения изотопных отношений очень близки ($-7,8$, $-8,0$ и $-7,7$ ‰, соответственно). В речных водах наблюдается как положительное (до $-7,2$ ‰), так и отрицательное (до $-9,7$ ‰) отклонение значений $\delta^{13}C_{DIC}$ относительно образцов, отобранных из водопадов. По данным лаборатории глобального мониторинга [22] для ближайшей станции наблюдений (гидрометеорологическая обсерватория Тикси – $71.60^{\circ}N$; $128.89^{\circ}E$; 19 mals) значения $\delta^{13}C$ атмосферного CO_2 в указанных широтах за 2011–2019 гг. в зависимости от времени года колеблется от $-9,2$ до $-7,7$ ‰ (рис. 4), со среднегодовыми значениями – около $-8,6$ ‰. Переход атмосферного углекислого газа в гидрокарбонат-ион сопровождается эффектом фракционирования, при котором происходит обеднение углекислоты тяжелым изотопом ^{13}C на $1,2$ ‰ [21]. Поэтому гипотетическое колебание изотопных отношений $\delta^{13}C_{DIC}$ метеорной воды должно составлять от $-10,4$ до $-8,9$ ‰ при среднегодовом $-9,8$ ‰.

Из табл. 2 видно, что указанным рамкам атмосферного CO_2 соответствуют только воды объекта № 5. Что характерно, именно для этого образца содержание гидрокарбонат-иона самое низкое ($19,5$ мг/дм³) и наиболее близко к естественным концентрациям DIC дождевых вод неурбанизированных зон, находящимся в пределах $16,4$ – $79,6$ моль/л [23]. Для других объектов характерны более высокие концентрации гидрокарбонат-иона. Концентрация диоксида углерода в воздухе и, соответственно, в водах сильно зависит от активности вегетации [24]. Учитывая, что отбор проб проводился в течение очень малого промежутка времени (с 21.07.2019 г. по 01.08.2019 г.), фактор изменения

вегетационной активности можно не рассматривать. С ростом концентрации углекислоты в водах наблюдается увеличение «тяжелого» изотопного сдвига отношения $\delta^{13}C_{DIC}$ (рис. 3, б), достигающего максимального значения для водопунктов 1, 6 и 4. Очевидно, для этих образцов наблюдается наибольшая степень изотопного обмена углерода углекислоты с окружением. Считается [19], что на изотопный состав $\delta^{13}C_{DIC}$ вод активное влияние может оказывать вегетация растений. При этом важно учитывать тип фотосинтеза растений (C_3 и C_4), поскольку он оказывает решающую роль. Наиболее наглядно влияние типа фотосинтеза растений может быть проиллюстрировано на примере выветривания континентальных карбонатов (для которых типичны $\delta^{13}C$ близкие к нулю) с участием CO_2 , производимым растениями. При преобладании растений типа C_3 конечный изотопный состав DIC, получаемый в результате смешивания углекислоты источников, равен $-9,6$ ‰. В случае преобладания растений типа C_4 ожидаемые значения $\delta^{13}C_{DIC}$ могут достигать $-2,6$ ‰ [19]. В нашем случае наиболее вероятной причиной «утяжеления» изотопного отношения $\delta^{13}C_{DIC}$ вод объекта № 4 представляется выветривание силикатов, содержащих углекислоту, образованную в ходе вегетации растений типа C_4 , которая может приводить к обогащению изотопного состава углерода вплоть до $-5,1$ ‰ [19]. Нельзя также полностью исключить вероятный контакт вод источника 4 с карбонатными породами, сформированными в большинстве случаев из морских систем, богатых тяжелыми изотопами углерода и имеющими значения отношений $\delta^{13}C$ близкие к нулю [25]. Тем не менее вопрос обмена вод с карбонатными породами остается открытым и требует дополнительного исследования.

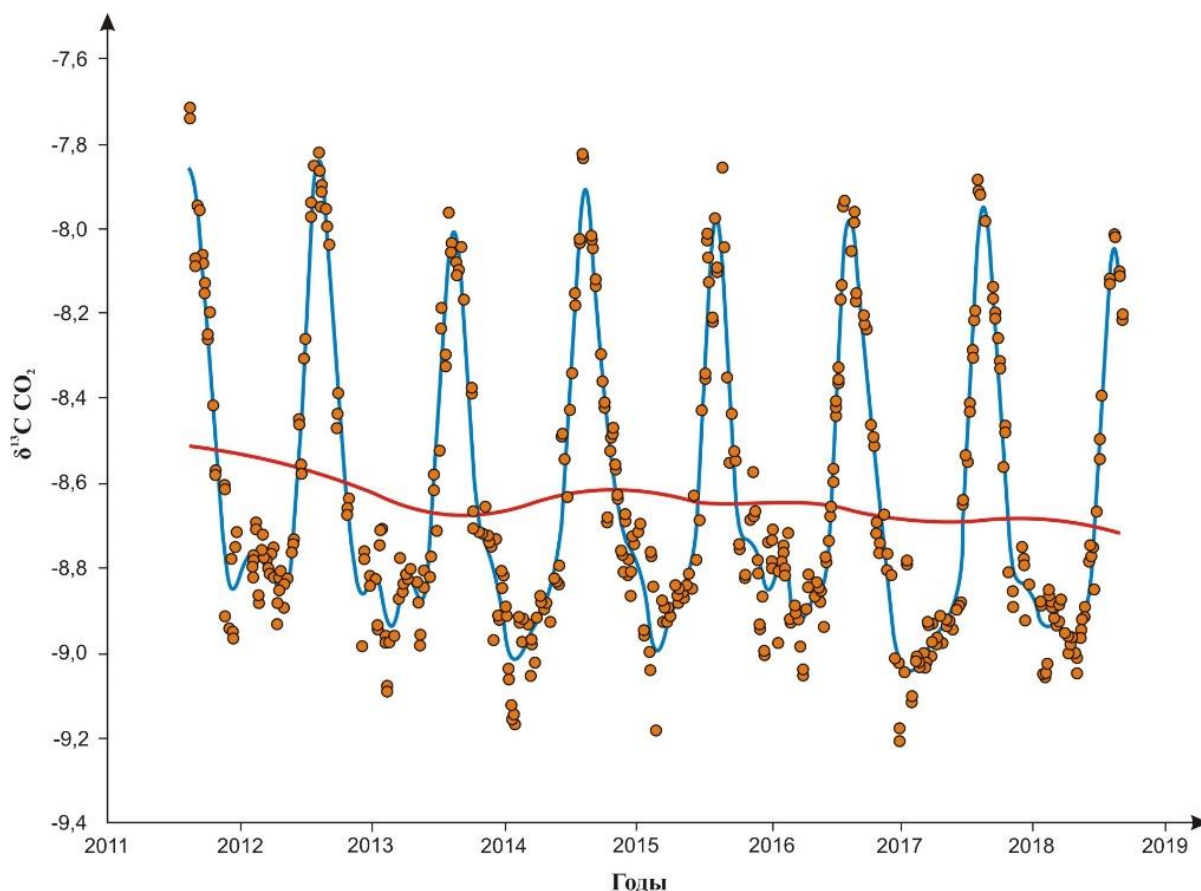


Рис. 4. Сезонные колебания изотопного отношения $\delta^{13}\text{C}$ атмосферного CO_2 по данным Гидрометеорологической обсерватории Тикси, Россия

Fig. 4. Seasonal fluctuations of the isotope ratio $\delta^{13}\text{C}$ of atmospheric CO_2 according to the Hydrometeorological Observatory Tiksi, Russia

В случае речных вод (№ 1, 6) к вышеперечисленным причинам обогащения углекислоты изотопом ^{13}C можно добавить фактор испарения и дегазации [26], приводящий к обеднению углекислоты легким изотопом и, следовательно, утяжелению изотопного отношения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Принимая во внимание наибольшие

концентрации гидрокарбонат-иона в водопунктах 1 и 6, следует отметить, что их обогащение углекислотой и изотопом ^{13}C происходит за счет внешних источников тяжелого изотопного состава, таких как вмещающие породы и углекислота, образованная в ходе вегетации растений типа C_4 .

Таблица 1. Химический состав природных вод юго-восточного склона кряжа Чекановского, мг/дм³

Table 1. Chemical composition of natural waters of south-east slope of the Chekanovsky ridge, mg/l

№ на рис. 1 No. on Fig. 1	pH	M	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	ХПК	Химический тип/Chemical type
1	7,9	96	58	14	0,6	18	2,7	2,4	0,4	8,9	$\text{M0,10} \frac{\text{HCO}_3^- 75 \text{SO}_4^{2-} 24 \text{Cl}^- 1}{\text{Ca}^{2+} 73 \text{Mg}^{2+} 20 \text{Na}^+ 8 \text{K}^+ 0,8} \text{pH} 7,9$
2	7,5	83	48	8	3,4	19	1,2	3	0,3		$\text{M0,08} \frac{\text{HCO}_3^- 75 \text{SO}_4^{2-} 15 \text{Cl}^- 9}{\text{Ca}^{2+} 80 \text{Na}^+ 11 \text{Mg}^{2+} 8 \text{K}^+ 0,5} \text{pH} 7,5$
3	7,3	93	33	36	0,4	19	3,2	1,4	0,4	1,6	$\text{M0,09} \frac{\text{SO}_4^{2-} 57 \text{HCO}_3^- 41 \text{Cl}^- 0,9}{\text{Ca}^{2+} 74 \text{Mg}^{2+} 20 \text{Na}^+ 5 \text{K}^+ 0,8} \text{pH} 7,3$
4	7,6	98	46	27	0,6	18	3,9	2,1	0,4	3,1	$\text{M0,10} \frac{\text{HCO}_3^- 56 \text{SO}_4^{2-} 42 \text{Cl}^- 1}{\text{Ca}^{2+} 68 \text{Mg}^{2+} 24 \text{Na}^+ 7 \text{K}^+ 0,8} \text{pH} 7,6$
5	6,9	63	19	24	2,4	12	2,4	2,4	0,3		$\text{M0,06} \frac{\text{SO}_4^{2-} 56 \text{HCO}_3^- 36 \text{Cl}^- 8}{\text{Ca}^{2+} 66 \text{Mg}^{2+} 21 \text{Na}^+ 11 \text{K}^+ 0,7} \text{pH} 6,9$
6	7,7	100	58	16	0,8	18,8	3,1	2,6	0,6	9,7	$\text{M0,10} \frac{\text{HCO}_3^- 72 \text{SO}_4^{2-} 26 \text{Cl}^- 2}{\text{Ca}^{2+} 71 \text{Mg}^{2+} 19 \text{Na}^+ 8 \text{K}^+ 1,1} \text{pH} 7,7$

Таблица 2. Геохимические и изотопные особенности природных вод юго-восточного склона кряжа Чекановского
Table 2. Geochemical and isotopes features of natural waters of south-east slope of the Chekanovsky ridge

№ на рис. 1 No. on Fig. 1	Ca/Na	Ca/Mg	Ca/Si	Mg/Si	Na/Si	Si/Na	rNa/rCl	SO ₄ /Cl	δD, ‰	ΔδD, ‰	δ ¹⁸ O, ‰	Δδ ¹⁸ O, ‰	δ ¹³ C _{DIC} , ‰	Δδ ¹³ C _{DIC} , ‰
1	7,5	6,7	14,2	2,1	1,9	0,5	6,0	23,8	–159,2	1,4	–20,5	0,1	–7,8	0,1
2	6,3	15,6	16,5	1,1	2,6	0,4	1,4	2,3	–149,3	–0,4	–19,5		–8,0	
3	13,5	6,0	16,1	2,7	1,2	0,8	5,1	83,5	–165,4	–0,1	–21,9		–8,4	
4	8,6	4,6	16,6	3,6	1,9	0,5	5,4	45,7	–183,0	–0,6	–24,2		–7,2	
5	5,0	5,0	19,1	3,8	3,8	0,3	1,5	10,0	–171,4	–1,3	–22,6		–9,7	
6	7,3	6,1	20,6	3,4	2,8	0,4	5,2	21,3	–165,7	2,2	–21,2		–7,7	

Примечания: 1 – Значения изотопных отношений $\delta^{18}\text{O}$ и δD представлены относительно шкал VSMOW2–SLAP2, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ – относительно VPDB; 2 – Величины $\Delta\delta\text{D}$, $\Delta\delta^{18}\text{O}$, $\Delta\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ отражают максимальные отклонения измеренных значений от усредненных δD , $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (неоднородность образца по изотопу).

Note: 1 – The values of the isotopic ratios $\delta^{18}\text{O}$ and δD are presented relative to the scales VSMOW2–SLAP2, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ – relative VPDB; 2 – Values $\Delta\delta\text{D}$, $\Delta\delta^{18}\text{O}$, $\Delta\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ reflect the maximum deviations of the measured values from the averaged δD , $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (sample heterogeneity by isotope).

Закключение

Исходя из вышесказанного можно сделать следующие выводы. Изучено два типа водопунктов: 1) реки; 2) временные водотоки, образующиеся в период таяния многолетнемерзлых пород. Воды относятся к ультрапресным с величиной общей минерализации, варьирующей от 63 до 100 мг/дм³, нейтральным и слабощелочным (рН 6,9–7,9) с показателем ХПК от 1,6 до 9,7 мг/дм³. Содержание кремния составляют от 0,6 до 1,3 мг/дм³. Каждый водопункт характеризуется своим химическим типом, преобладающими ионами являются HCO_3^- (58 мг/дм³) и Ca (19 мг/дм³). Отличительной чертой временных водотоков является преобладание в этих водах сульфат-иона от 24 до 36 мг/дм³.

Рассчитанные геохимические коэффициенты показали, что временные водотоки № 1, 2 отличаются высоким отношением SO_4/Cl (46–83). Предположительно это связано с дренированием массива пород с наличием сульфидной минерализации. О преобладании во вмещающих породах кальциевых минералов говорит отношение Ca/Si, которое возрастает от 14 до 20 по гидрогеохимическому профилю от водопункта № 1 к № 6. По другим геохимическим коэффициентам (Ca/Na, Ca/Mg, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, rNa/rCl) не удалось выявить значимых различий.

С ростом общей минерализации возрастают концентрации таких элементов, как: B, Si, Sc, V, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ga, As, Se, Br, Rb, Y, Sn, Ba, Pb, Th и U, но снижаются концентрации Ti, Al, Fe, Ni, Ge, Sr, Sb, I. Можно выделить несколько объектов, в которых установлены максимальные концентрации ряда элементов: в водопаде № 2 (№ 4) – Br 0,013 мг/дм³, Mo 0,0003 мг/дм³, в водопаде (косой распадок) (№ 5) Ni 0,003 мг/дм³, I 0,071 мг/дм³ и в водах реки Атыркан (№ 6) – Zn 0,003 мг/дм³ и Mn 0,01 мг/дм³. Также выделяются объекты с минимальными концентрациями:

в реке Непелях (№ 2) – Pb до $9 \cdot 10^{-6}$, Th до $2 \cdot 10^{-6}$ мг/дм³, в водопаде № 2 (№ 4) – Mn до 0,0003 мг/дм³, Ti до 0,0002 мг/дм³ и V до $9 \cdot 10^{-6}$ мг/дм³.

Рассчитанные коэффициенты концентрации и водной миграции выявили особенности накопления элементов в водах. Первый показал, что в изучаемых водах не наблюдается значимых величин их концентрирования. По второму очень сильной интенсивностью миграции обладают I, Se, Br; сильной Sr, B, Sb; средней As, P, Ni, Cu, Li, Ba, Zn, U, Sn, Mo и слабой (инертной) Sc, Y, Be, Mn, Pb, Si, Ge, Cr, Rb, Co, V, Fe, Ga, Th, Al, Zr, Ti. Некоторые элементы из установленных А.И. Перельманом рядов миграции переходят из своих привычных групп, что можно связать с большим антропогенным влиянием на поверхностные воды изучаемого региона и их повышенными содержаниями в дренируемых породах относительно кларка. Детальные литолого-минералогические исследования горных пород ведутся в настоящее время.

Использование комплекса $[\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} + \delta^{18}\text{O} + \delta\text{D}]$ позволяет однозначно отнести исследованные воды к метеорным. Наблюдается смещение акцента питания вод от зимнего к летнему для рек, в то время как для водопадов в большей степени проявляются зимние (снеговые) источники. В ходе «маршрута» следования вод наблюдается их обогащение изотопом $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Наиболее вероятными источниками утяжеления изотопного состава представляются углекислота, образованная в ходе вегетации растений типа C_4 , а также вероятный обмен изотопами углерода с карбонатными породами.

Исследования проводились при финансовой поддержке проектов ФНИ № 0331-2019-0004, 0331-2019-0021, 0331-2019-0025 и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики» и № 19-05-00130.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фотиев С.М. Подземные воды криогенной области России (классификация) // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII. – № 2. – С. 41–59.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист R-52 – Тикси. Объяснительная записка /

- М.В. Герцева, Т.П. Борисова, Е.Д. Чибисова, Е.Н. Емельянова, В.Г. Черенков, Л.М. Игнатъева, И.А. Котов, Е.Б. Истошина, И.А. Федосеев. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. – 312 с.
3. Габышев В.А., Габышева О.И. К изучению фитопланктона и физико-химических параметров вод р. Оленек // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2010. – № 3. – С. 51–55.

4. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
5. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры // Уральский геологический журнал. – 2010. – № 3 (75). – С. 85–90.
6. Stable water isotope modeling reveals spatio-temporal variability of glacier meltwater contributions to Ganges River headwaters / S. Borral, I.S. Sen, D. Ghosal, B. Peucker-Ehrenbrink, J.D. Hemingway // Journal of Hydrology. – 2019. – V. 577. – 123983.
7. Stream water age distributions controlled by storage dynamics and nonlinear hydrologic connectivity: modeling with high-resolution isotope data / C. Soulsby, C. Birkel, J. Geris, J. Dick, C. Tunaley, D. Tetzlaff // Water Resour. Res. – 2015. – V. 51. – P. 7759–7776.
8. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) / D. Chafouq, A.El. Mandour, M. Elgettafi, M. Himi, I. Choukri, A. Casas // Journal of African Earth Sciences. – 2018. – V. 139. – P. 1–13.
9. Spatial distribution and controlling factors of surface water stable isotope values ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) across Kazakhstan, Central Asia / H. Wu, J. Wu, F. Song, J. Abuduwaili, A.S. Saparov, X. Chen, B. Shen // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 678. – P. 53–61.
10. Using H, O, Rn isotopes and hydrometric parameters to assess the surface water-groundwater interaction in coastal wetlands associated to the marginal forest of the Río de la Plata / L. Santucci, R. Sanci, E. Carol, E. Villalba, H. Panarello // Continental Shelf Research. – 2019. – V. 186. – P. 104–110.
11. O, H, C isotope geochemistry of carbonated mineral springs in central Victoria, Australia: sources of gas and water-rock interaction during dying basaltic volcanism / I. Cartwright, T. Weaver, S. Tweed, D. Ahearne, M. Cooper, C. Czarnik, J. Tranter // Journal of Geochemical Exploration. – 2000. – V. 257–26. – P. 69–70.
12. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2020. – V. 390. – 106708. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106708> (дата обращения: 01.06.2020).
13. Environmental controls on the carbon and water (H and O) isotopes in peatland Sphagnum mosses / Z. Xia, Y. Zheng, J.M. Stelling, J. Loisel, Y. Huang, Z. Yu // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2020. – V. 277. – P. 265–284.
14. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
15. Newman C.P. Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 210. – 106445.
16. Genesis of formation water in the northern sedimentary basin of South China Sea: clues from hydrochemistry and stable isotopes (D, ^{18}O , ^{37}Cl and ^{81}Br) / H. Yu, T. Ma, Y. Du, L. Chen // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 196. – P. 57–65.
17. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil-vegetation-atmosphere system: stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration // Physics and Chemistry of the Earth. – 2010. – V. 35. – P. 565–570.
18. Sources and sinks of dissolved inorganic carbon in an urban tropical coastal bay revealed by $\delta^{13}\text{C}$ -DIC signals / L.C. Cotovicz Jr., B.A. Knoppers, L. Deirmendjian, G. Abril // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2019. – V. 220. – P. 185–195.
19. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes // Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – V. 236. – Iss. 1–2. – P. 419–429.
20. Deirmendjian L., Abril G. Carbon dioxide degassing at the groundwater-stream-atmosphere interface: isotopic equilibration and hydrological mass balance in a sandy watershed // Journal of Hydrology. – 2018. – V. 558. – P. 129–143.
21. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO_2 // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – Iss. 1. – P. 107–114.
22. Global Monitoring Laboratory. URL: <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/> (дата обращения: 01.06.2020).
23. Liu Z., Dreybrodt W., Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO_2 budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms // Earth-Science Reviews. – 2010. – V. 99. – № 3–4. – P. 162–172.
24. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO_2 / M. Górka, P.E. Sauer, D. Lewicka-Szczepak, M.-O. Jędrysek // Environmental Pollution Volume. – 2011. – V. 159. – № 1. – P. 294–301.
25. Keith M.L., Weber J.N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestone and fossils // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1964. – V. 28. – P. 1787–1816.
26. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in-cave evolution of drip water along discrete flow paths / P.J. Mickler, P. Carlson, J.L. Banner, D.O. Brecker, L. Stern, A. Guilfoyle // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – V. 244. – P. 182–196.

Поступила: 08.06.2020 г.

Информация об авторах

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Максимова А.А., студент Новосибирского национального исследовательского университета.

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

Ян П.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

UDC 556:550.845 (292.511/.516)

FIRST ISOTOPE-HYDROGEOCHEMICAL DATA ON THE NATURAL WATERS OF THE SOUTH-EAST SLOPE OF THE CHEKANOVSKY RIDGE (ARCTIC AREAS OF THE SIBERIAN PLATFORM)

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

Anastasia A. Maksimova²,
rock.nastaya64@gmail.com

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

Petr A. Yan^{1,2},
YanPA@ipgg.sbras.ru

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

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

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

The relevance of the study is caused by the obtaining of the previously unexplored isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the south-east slope of the Chekanovsky ridge (Arctic regions of the Siberian Platform). The study area is difficult due to the access continuous distribution of permafrost.

The aim of the research is to identify the geochemical features of the natural waters of the south-east slope of the Chekanovsky ridge.

Methods. Field sampling was carried out in accordance with generally accepted methods. Chemical analytical studies were performed by titrimetry, ion chromatography and inductively coupled plasma mass spectrometry. The analysis of the isotope ratios (δD , $\delta^{18}O$, and $\delta^{13}C_{DIC}$) was carried out on an Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253 equipped with H/Device (for analyzing δD ratios) and GasBench II (for analyzing $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C_{DIC}$ ratios) sample preparation attachments. In the study of hydrogeochemical data, we used geochemical coefficients (Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, rNa/rCl and SO_4/Cl), coefficients of concentration and water migration according to A.I. Perelman.

Results. The paper presents the first results of isotope-geochemical studies of the natural waters of the south-east slope of the Chekanovsky ridge, located in the downstream of the Lena river, in the Arctic regions of the Siberian Platform. The rivers and temporary streams formed during the period of thawing of permafrost have been studied. It was established that the waters are ultra-fresh with a total salinity of 63 to 100 mg/dm³, neutral and slightly alkaline in terms of pH (6.9–7.9), characterized by chemical oxygen demand (COD) from 1.6 to 9.7 mgO/dm³. River waters have a predominantly bicarbonate calcium composition. Temporary streams are characterized by the predominance of sulfate ion, as well as low COD values – from 1.6 to 3.1 mgO/dm³. The calculated coefficients of water migration were distributed as follows: very high intensity of migration of I, Se, Br; high Sr, B, Sb; average As, P, Ni, Cu, Li, Ba, Zn, U, Sn, Mo; low Sc, Y, Be, Mn, Pb, Si, Ge, Cr, Rb, Co, V, Fe, Ga, Th, Al, Zr, Ti. The isotopic ratios of oxygen and hydrogen were studied in a wide range for $\delta^{18}O$ – from –24.2 to –19.5 ‰, and for δD – from –183.0 to –149.3 ‰. According to the isotopic composition the waters have a meteor origin. A shift in the water supply from winter to summer is observed for rivers, while winter (snow) sources are more pronounced for temporary streams. The $\delta^{13}C_{DIC}$ isotopic ratios range from –9.7 to –7.2 ‰. In river waters, both positive (up to –7.2 ‰) and negative (up to –9.7 ‰) deviations of $\delta^{13}C$ relative to samples taken from temporary streams (characterized by values from –8.0 to –7 ‰), are observed. It supposed enrichment of water with carbon dioxide and heavy isotope ^{13}C firstly due to material and isotopic exchange with the carbonate rocks weathered by soil CO_2 formed from plants of type C_4 .

Key words:

Natural waters, chemical composition, stable isotopes $\delta^{18}O$, δD , $\delta^{13}C_{DIC}$, permafrost rocks, intensity of water migration of elements, south-east slope of the Chekanovsky ridge, Siberian platform, Arctic.

The research was financially supported by the FSR no. 0331-2019-0004, 0331-2019-0021, 0331-2019-0025 and the Russian Foundation for Basic Research as part of the scientific project no. 18-05-70074 «Arctic Resources» and no. 19-05-00130.

REFERENCES

1. Fotiev S.M. Underground waters of cryogenic area of Russia (classification). *Earth's Cryosphere*, 2013, vol. XVII, no. 2, pp. 41–59. In Rus.
2. Gertseva M.V., Borisova T.P., Chibisova E.D., Emelyanova E.N., Cherenkov V.G., Ignatyeva L.M., Kotov I.A., Istoshina E.B., Fe-

doseev I.A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Verkhoyano-Kolymskaya. List R-52 – Tiksi. Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Verkhoyano-Kolyma. Sheet R-52 – Tiksi. Explanatory note]. St-Petersburg, Cartographic Factory VSEGEI Publ., 2016. 312 p.

3. Gabyshev V.A., Gabysheva O.I. K izucheniyu fitoplanktona i fiziko-khimicheskikh parametrov vod r. Olenek [To the study of phytoplankton and physicochemical parameters of the Olenek river waters]. *Bulletin SVNTS FEB RAS*, 2010, no. 3, pp. 51–55.
4. Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 342 p.
5. Grigoryev N.A. Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory [Distribution of chemical elements in the upper continental crust]. *Uralskiy geologicheskii zhurnal*, 2010, no. 3 (75), pp. 85–90.
6. Boral S., Sen I.S., Ghosal D., Peucker-Ehrenbrink B., Hemingway J.D. Stable water isotope modeling reveals spatio-temporal variability of glacier meltwater contributions to Ganges River headwaters. *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 577, 123983.
7. Soulsby C., Birkel C., Geris J., Dick J., Tunaley C., Tetzlaff D. Stream water age distributions controlled by storage dynamics and nonlinear hydrologic connectivity: modeling with high-resolution isotope data. *Water Resources Research*, 2015, vol. 51, pp. 7759–7776.
8. Chafouq D., Mandour A.E., Elgettafi M., Himi M., Chouikri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2018, vol. 139, pp. 1–13.
9. Wu H., Wu J., Song F., Abuduwaili J., Saparov A.S., Chen X., Shen B. Spatial distribution and controlling factors of surface water stable isotope values ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) across Kazakhstan, Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 678, pp. 53–61.
10. Santucci L., Sanci R., Carol E., Villalba E., Panarello H., Using H., O, Rn isotopes and hydrometric parameters to assess the surface water-groundwater interaction in coastal wetlands associated to the marginal forest of the Rio de la Plata. *Continental Shelf Research*, 2019, vol. 186, pp. 104–110.
11. Cartwright I., Weaver T., Tweed S., Ahearne D., Cooper M., Czarnik C., Tranter J. O, H, C isotope geochemistry of carbonated mineral springs in central Victoria, Australia: sources of gas and water-rock interaction during dying basaltic volcanism. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, vol. 257–26, pp. 69–70.
12. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, vol. 390, 106708. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106708> (accessed 1 June 2020).
13. Xia Z., Zheng Y., Stelling J.M., Loisel J., Huang Y., Yu Z. Environmental controls on the carbon and water (H and O) isotopes in peatland Sphagnum mosses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 277, pp. 265–284.
14. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
15. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 210, article 106445.
16. Yu H., Ma T., Du Y., Chen L. Genesis of formation water in the northern sedimentary basin of South China Sea: Clues from hydrochemistry and stable isotopes (D, ^{18}O , ^{37}Cl and ^{81}Br). *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 196, pp. 57–65.
17. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil-vegetation-atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, vol. 35, p. 565–570.
18. Cotovicz Jr. L.C., Knoppers B.A., Deirmendjian L., Abril G. Sources and sinks of dissolved inorganic carbon in an urban tropical coastal bay revealed by $\delta^{13}\text{C}$ -DIC signals. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, vol. 220, pp. 185–195.
19. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: Sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 236, Iss. 1–2, pp. 419–429.
20. Deirmendjian L., Abril G. Carbon dioxide degassing at the groundwater-stream-atmosphere interface: isotopic equilibration and hydrological mass balance in a sandy watershed. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 558, pp. 129–143.
21. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO_2 . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, Iss. 1, pp. 107–114.
22. Global Monitoring Laboratory. Available at: <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/> (accessed 1 June 2020).
23. Liu Z., Dreybrodt W., Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO_2 budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 99, Iss. 3–4, pp. 162–172.
24. Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczepak D., Jędrysek M.-O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO_2 . *Environmental Pollution Volume*, 2011, vol. 159, Iss. 1, pp. 294–301.
25. Keith M.L., Weber J.N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestone and fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, vol. 28, pp. 1787–1816.
26. Mickler P.J., Carlson P., Banner J.L., Breecker D.O., Stern L., Guilfoyle A. Quantifying carbon isotope disequilibrium during incave evolution of drip water along discrete flow paths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 244, pp. 182–196.

Received: 8 June 2020.

Information about the authors

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

Anastasia A. Maksimova, student, Novosibirsk State University.

Aleksandr N. Pyrayev, Cand. Sc., junior researcher, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; assistant, Novosibirsk State University.

Petr A. Yan, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

УДК 622.24

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОЛОГИИ ВЫБОРА РАСТВОРОВ ПЕРВИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ НА ОСНОВЕ ПРОВЕДЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КЕРНЕ

Конесев Василий Геннадьевич¹,
Konesev.VG@gazpromneft-ntc.ru

Четвертнева Ирина Амировна²,
chetvertneva@ufa.scsbm.ru

Тептерева Галина Алексеевна³,
teptereva.tga@yandex.ru

¹ ООО «Газпромнефть НТЦ»,
Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75–79.

² Волго-Уральский регион ООО «Сервисный Центр СБМ»,
Россия, 450005, г. Уфа, ул. Заводская, 15/1.

³ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450065, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью формирования требований для качественного подбора технологических жидкостей для вскрытия продуктивных пластов в сложных горно-геологических условиях. Важным является проведение экспериментальных исследований для оценочной экспертизы воздействия на фильтрационно-емкостные свойства кернового материала, отобранного на Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении. Данное направление актуально в связи с необходимостью сохранения коллекторских свойств продуктивных пластов и продуктивности скважин при их строительстве и освоении.

Цель: формирование перечня рекомендаций по планированию и проведению фильтрационных исследований на керновом материале при оценке влияния технологических жидкостей на фильтрационно-емкостные свойства горных пород.

Объекты: керновый материал – песчаник мелкозернистый, алевролитистый с признаками углеводородов; отобранный на Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении; растворы первичного вскрытия различных систем – на водной и углеводородной основах; пресный полимер-глинистый и KCl-полимеркарбонатный буровые растворы.

Методы: изучение степени повреждения фильтрационно-емкостных свойств пласта различными технологическими жидкостями; оценка значений коэффициентов восстановления первоначальной проницаемости кернового материала, отобранного на Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении в различных условиях, максимально приближенных к пластовым условиям по величинам пластового давления и температуры.

Результаты. Разработан перечень рекомендаций по планированию и проведению фильтрационных исследований на керне при подборе технологических жидкостей для вскрытия пластов. На реальных примерах показаны ключевые моменты методологии, при несоблюдении которых можно получить ошибочное понимание о соответствии или несоответствии исследуемых технологических жидкостей вскрываемым объектам эксплуатации.

Ключевые слова:

Буровой раствор, первичное вскрытие, фильтрационно-емкостные свойства, продуктивный пласт, восстановление проницаемости, керновый материал, продуктивность, фильтрат, депрессия, кольтмант.

Введение

Проблема качественного первичного вскрытия продуктивных пластов с массовым приходом технологии стимуляции притока методом гидравлического разрыва пород (ГРП) сохраняется. В последнее время отмечается рост объемов строительства скважин на запасы нефтяных оторочек и подгазовых залежей, где гидравлический разрыв пород нецелесообразен. Также сохраняется потребность и, по нашему мнению, в дальнейшем будет только расти в строительстве горизонтальных скважин без многостадийных ГРП при уплотнении сетки скважин с целью вовлечения остаточных запасов на зрелых месторождениях, где близость фронта вытеснения и подошвенных вод не позволяет создавать трещины высокой проводимости. Стандартный подход в подборе растворов первичного

вскрытия включает экспериментальную часть на керновом материале при изучении степени повреждения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пласта различными технологическими жидкостями, применяемыми при строительстве скважин. Фильтрационные исследования на керновом материале основаны на сравнении результатов от воздействия различных сред в максимально приближенных условиях, сопоставимых с промысловыми, и опираются на принципы физического моделирования, в связи с чем значения коэффициентов восстановления проницаемости следует рассматривать только на качественном уровне. Начальный этап планирования экспериментов является определяющим – от уровня сопоставимости условий эксперимента зависят итоговые результаты. На примере исследований, выполненных в 2017 г. для

условий Заполярного НГКМ, рассмотрены вопросы соответствия выбора методики тестирования. Исследования выполнялись согласно требованиям [1].

О методике исследования

Целью исследования являлся выбор наиболее предпочтительных систем бурового раствора для вскрытия объекта эксплуатации, а также оценка влияния на ФЕС пласта двух типов бурового раствора с углеводородными кольматантами, применяемых при строительстве скважин поисково-разведочного бурения (ПРБ): пресный полимер-глинистый и KCl-полимеркарбонатный.

В экспериментальных исследованиях использовались 13 образцов кернового материала, представленные песчаником мелкозернистым, алевролитом с признаками углеводородов, которые имели значения пористости в пределах 9,7–17,55 %; значения абсолютной проницаемости с поправкой по Клинкенбергу в пределах 1,10–58,26 мД; значения остаточной водонасыщенности в пределах 19,87–42,86 %; значения объема пор в пределах 2,09–3,60 см³; с различными геометрическими характеристиками.

В работе использовались системы буровых растворов на водной основе, такие как пресный полимер-глинистый (пресный ПГР) и KCl-полимер карбонатный (KCl ПКР), буровой раствор на водной основе (РВО), а также системы буровых растворов на углеводородной основе (РВО). Перечисленные системы буровых растворов имеют различные технологические параметры: значение плотности варьируется от 1,01 до 1,17 г/см³; показателя фильтрации (ПФ) – от 3 до 6 см³/30 мин; статического напряжения сдвига (СНС) – от 6/8 до 8/12 фунт/100 фут²; пластической вязкости – от 14 до 30 мПа*с; динамического напряжения сдвига – от 12 до 20 фунт/100фут². Данные значения технологических параметров приведенных систем буровых растворов зависят от используемых химических реагентов и материалов в составе буровых растворов, основные параметры и рецептуры перечисленных систем буровых растворов приведены в табл. 1.

Системы буровых растворов были предоставлены подрядными организациями, выполняющими работы по сопровождению буровых растворов на Заполярном НГКМ. Фракционный состав кольматанта (CaCO₃) был подобран на специализированном программном обеспечении с учётом данных по ФЕС для каждой составной колонки керна. Современные программные комплексы используют совокупность законов кольматации, теоретические аспекты и методологию подбора фракционного состава кольматанта. Для расчета фракционного состава кольматанта возможно использование различных критериев, например критерия Абрамса [2], по которому размер частиц, способных образовать сводовые перемычки в поровом пространстве проницаемого пласта, должен быть равен или больше 1/3 среднего размера пор пласта, а их содержание должно быть не меньше 5 % от объема твердых частиц, находящихся в буровом растворе. Однако данный критерий не указывает на распределение частиц по размерам в составе бурового раствора для обеспечения их эффек-

тивной упаковки, а позволяет только определить размер частиц, необходимый для начала кольматации. Например, метод перекрытия наибольшего диапазона частиц «Shotgun» [3], использующий широкий диапазон размеров частиц при отсутствии данных по характеристикам пласта, позволяет только рассчитать содержание кольматантов различного фракционного состава в необходимых пропорциях, поэтому не всегда является эффективным.

Таблица 1. Значения параметров и рецептуры исследуемых растворов*

Table 1. Values of parameters and formulations of test solutions*

Наименование Name	РВО WBS	РВО+ПАВ WBS+SAS	РВО HBS	Пресный ПГР Salt-free bentonite mud	KCl ПКР KCl-polymer mud
Основные параметры/Main parameters					
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,05		1,01	1,17	1,17
ПФ, см ³ /30мин PF, sm ³ /30 min	5		3	7	6
СНС 10с/10мин, фунт/100фут ² SNS 10s/10min pound/100 feet ²	6/8		8/12	7/12	6/10
ПВ, мПа*с/PV, mPa*s	14		30	24	20
ДНС, фунт/100 фут ² DNC, pound/100 feet ²	20		12	16	18
Рецептура/Recipe					
NaOH	0,3	0,3	–	0,18	–
Орг. ингибитор Organic inhibitor	12	12	–	–	–
ПАВ/SAS		7	–	–	–
Крахмал/Starch	22	22	–	–	–
Биополимер Biopolymer	4	4	–	1,5	3,5
CaCO ₃	50	50	32	174	60
Масло/Oil	–	–	287,1	–	–
Органобентонит Organobentonite	–	–	3,2	–	–
Эмульгатор Emulsifier	–	–	8,8	–	–
Известь/Lime	–	–	12	–	–
CaCl ₂ (p-p 35 %) CaCl ₂ (solution 35 %)	–	–	78,4	–	–
Модиф. реологии Rheology modif.	–	–	2,4	–	–
Смачиватель Wetting agent	–	–	0,8	–	–
Понижитель фильтрации Filtration reducing agent	–	–	4,8	–	–
Бентонит/Bentonite	–	–	–	15	–
ПАЦ НВ/PAC NV	–	–	–	3	9
Инкапсулянт Encapsulator	–	–	–	5,5	–
Na ₂ CO ₃	–	–	–	0,5	–
KCl	–	–	–	–	65
Сульф. асфальт Sulfated asphalt	–	–	–	15	8

* РВО – раствор на водной основе; РВО – раствор на углеводородной основе; ПКР – полимеркарбонатный; ПАВ – поверхностно-активное вещество.

* WBS – water-based solution; HBS – hydrocarbon-based solution; PC – polymer-carbonate; SAS – a surface-active substance.

Метод, основанный на теории идеальной упаковки (IPT – Ideal Packing Theory), разработанной М. Кауффером [4, 5], может предоставить более реальные расчеты в определении оптимального фракционного состава используемых кольматантов. По данному методу кольматант образует идеальную упаковку, если гранулометрический состав частиц обеспечивает эффективное закупоривание всех пор, включая поры, образуемые между твердыми частицами. Буровой раствор с кольматантом, имеющим фракционное распределение частиц, в соответствии с теорией идеаль-

ной упаковки, способен образовать фильтрационную корку с минимальной проницаемостью.

В табл. 2 приведены обобщенные результаты фильтрационных экспериментов. Оценка восстановления проницаемости проводилась при одних и тех же объемных скоростях фильтрации в рамках одного эксперимента, до и после создания рабочей депрессии 2,0 МПа. После выемки образцов керна выполнен замер остаточной водонасыщенности и определена степень её изменения.

Таблица 2. Обобщенные результаты фильтрационных экспериментов

Table 2. Summary results of filtration experiments

№ кол. Col. no.	Буровой раствор Drilling fluid	K _{абс} , мД K _{abs} , mD	K ₁ , мД K ₁ , mD	ΣC мела, г/л Chalk ΣC, g/l	V _ф /V _{пор} , V _f /V _{por}	Изм S _в , (кол) % Sw change (col) %	Изм S _в , (2+3) % Sw change, (2+3) %	До депрессии Before depression		После депрессии After depression	
								КВП/KVP			
								(кол) % (col) %	(2+3) %	(кол) % (col) %	(2+3) %
Растворы для бурения горизонтальных стволов (ГС) Solutions for drilling horizontal wells (HS)											
7	PBO WBS	40,6	20,8	50	6,1	18	11	12	15	26	33
1	PBO+ПАВ WBS+SAS	43	21,5	50	2,6	14	14	57	65	75	83
2	PVO HBS	55,9	29,5	32	3,8	4	4	68	79	80	86
8	PBO WBS	5,2	2,3	50	5,1	25	22	24	28	41	47
3	PBO+ПАВ WBS+SAS	4,5	2,0	50	1,7	21	15	38	52	55	76
5	PVO HBS	6,0	2,6	32	0,2	13	−2	83	91	90	90
9	PBO WBS	2,7	1,3	50	4,7	17	14	34	46	53	69
4	PBO+ПАВ WBS+SAS	2,0	0,8	50	0,4	11	6	36	45	52	61
6	PVO HBS	3,0	1,4	32	1,4	−36	−39	71	81	85	93
Растворы для бурения поисково-разведочных скважин (ПРБ) Solutions for drilling exploratory wells (DEW)											
10	KCl ПКР KCl PKR	20,9	11,5	60	6,2	18	16	21	27	40	51
11	Пресный ПГР Fresh PCS	18,2	9,9	174	0,6	19	16	29	34	42	51
12	KCl ПКР KCl PKR	1,8	0,7	60	3,7	12	8	24	31	51	65
13	Пресный ПГР Fresh PCS	1,2	0,4	174	0,5	13	11	38	45	52	63

* PBO – раствор на водной основе; PVO – раствор на углеводородной основе; ПКР – полимеркарбонатный; K_1 – начальная фазовая проницаемость по керосину; $\sum C$ мела – суммарная концентрация мела; V_f – объем фильтрата, проникшего в колонку керна; $V_{пор}$ – объем пор колонки керна; Изм S_v – изменение остаточной водонасыщенности по всей колонке керна; Изм S_v (2+3) – изменение остаточной водонасыщенности суммарно по второму и третьему образцам; КВП – коэффициент восстановления проницаемости.

* WBS – water-based solution; HBS – hydrocarbon-based solution; PC – polymer-carbonate; K_1 – initial phase permeability of kerosene; Chalk $\sum C$ – chalk total concentration; VF – volume of filtrate that has penetrated the core column; V_{por} – core column pore volume; Sw change – change in residual water saturation throughout the core column; Sw change (2+3) – change in residual water saturation in total for the second and third samples; PRC – permeability recovery coefficient.

Следует отметить, что даже в случае фактической депрессии на пласт 9,0–15,0 МПа за счёт депрессионной воронки перепад давления у стенки скважины на расстоянии 3–10 см не будет превышать 1,0–2,0 МПа [6], что обязательно необходимо учитывать при планировании фильтрационных экспериментов. Показано, что градиентов давления, при которых происходит определение фазовых проницаемостей, может

быть недостаточно для воспроизведения реальных условий, и очистка ПЗП за счёт перепада давления не воспроизводится в полной мере. Также известно, что глубина проникновения любой твёрдой фазы значительно меньше, чем глубина проникновения фильтрата промывочной жидкости [6–11]. Поэтому коэффициенты восстановления проницаемости приведены дифференцированно по общей длине составной мо-

дели и без учёта первого образца, в котором имеется основное скопление кольматантов (мел, асфальтены).

При прочих равных условиях объёмы проникновения фильтрата (табл. 2, столбец « $V_f/V_{пор}$ ») водного раствора с добавкой поверхностно активного вещества (ПАВ) ниже, чем у водной системы без ПАВ, что может указывать на определённое гидрофобизирующее действие реагента. Подтверждением проявления данного эффекта также может являться и то, что в экспериментах с ПАВ в диапазоне фазовой проницаемости K_1 более 2 мД (№ колонок 1 и 3) объёмы проникновения фильтрата превышают объём пор, но при этом получен значительный коэффициент восстановления проницаемости, близкий к значениям, полученным на РУО.

Мировой опыт вскрытия и стимуляции притока из низко-проницаемых коллекторов показывает необходимость использования специальных добавок к технологическим жидкостям (ПАВ), которые позволяют снижать межфазное натяжение и тем самым миними-

зировать образование микроэмульсий и водных блоков [12–14]. В работах [15, 16] приводятся результаты исследований таких добавок с позиции снижения капиллярных давлений, а в работах [17, 18] уделяется внимание эффектам гидрофобизации поверхности катион-активными ПАВ. При планировании применения ПАВ в буровых промывочных растворах следует оценивать не только совместимость с пластовыми флюидами и горными породами, но и уделять особое внимание сохранению эффективной рабочей концентрации в дисперсных системах. Для определения концентрации ввода ПАВ в буровой раствор обязательным действием должна являться оценка адсорбционных потерь [19]. В экспериментах с РУО отмечается снижение остаточной водонасыщенности, что можно связать с гидрофобизирующим действием неполярной среды.

На диаграммах (рис. 1, 2) графически представлен характер изменения коэффициента восстановления фазовой проницаемости для различных диапазонов абсолютной проницаемости кернов.

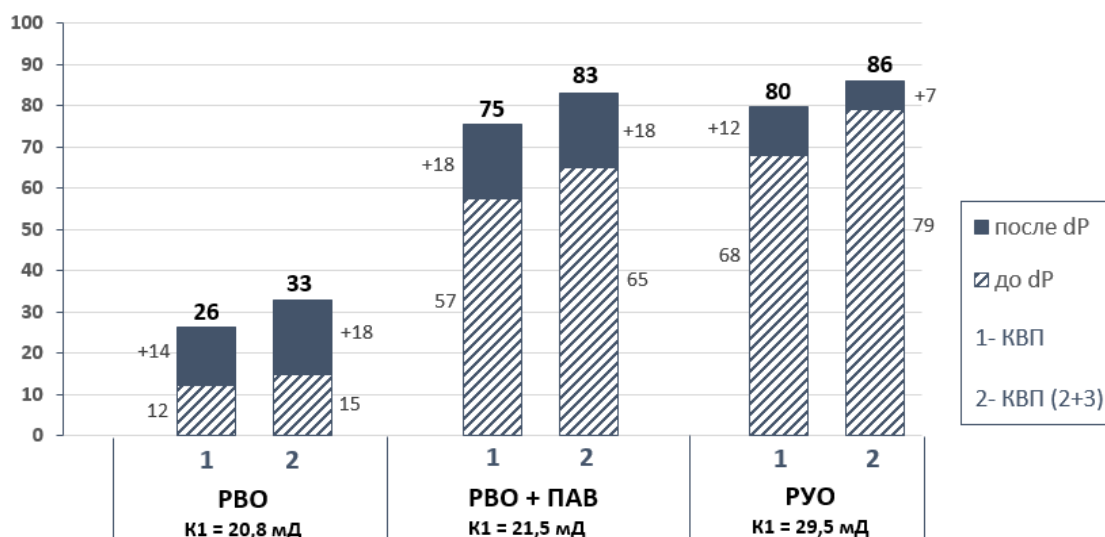


Рис. 1. Динамика изменения коэффициента восстановления фазовой проницаемости для диапазонов абсолютной проницаемости кернов 40–56 мД

Fig. 1. Dynamics of change of phase permeability recovery coefficient for absolute permeability ranges of cores of 40–56 mD

Видно, что наилучшим сохранением фазовой проницаемости по керосину обладает РУО. Среди водных растворов получено превосходство раствора с добавкой неионогенного ПАВ.

В областях низкой проницаемости данная зависимость не фиксируется, однако, если принимать во внимание различие в начальных значениях проницаемости, тенденция сохраняется (рис. 2).

Результаты с применением буровых растворов для скважин поисково-разведочного бурения (ПРБ) приведены на рис. 3.

Проведенные экспериментальные исследования по определению относительных значений коэффициента восстановления проницаемости (КВП) для всей колонки и двух последних образцов показали, что пресная система бурового раствора содержала в 3 раза больше кольматанта, что отразилось на количестве фильтрата, поступившего в образцы керна, и, соответственно, по-

влияло на коэффициенты восстановления проницаемости в обоих рассматриваемых диапазонах.

Если рассматривать восстановление проницаемости без учёта первого со стороны загрязнения образца (КВП 2+3), то картина меняется, и степень повреждения ФЕС в удалённой от стенки скважины сопоставима для обеих систем БР. Учитывая объёмы проникновения фильтратов и их потенциальную ингибирующую способность, можно сделать вывод о том, что даже незначительное проникновение пресного фильтрата наносит более тяжёлый ущерб ФЕС пласта. Объём проникновения фильтрата у ингибированной системы кратно выше, а коэффициенты восстановления проницаемости без учёта первого образца схожи. Даже 50 % объёма пор, занимаемого пресным фильтратом, снизили проницаемость на 40–50 %, что говорит о плохих деблокирующих свойствах пресной среды. Поэтому данные системы не рекомендованы для вскрытия продуктивных пластов.

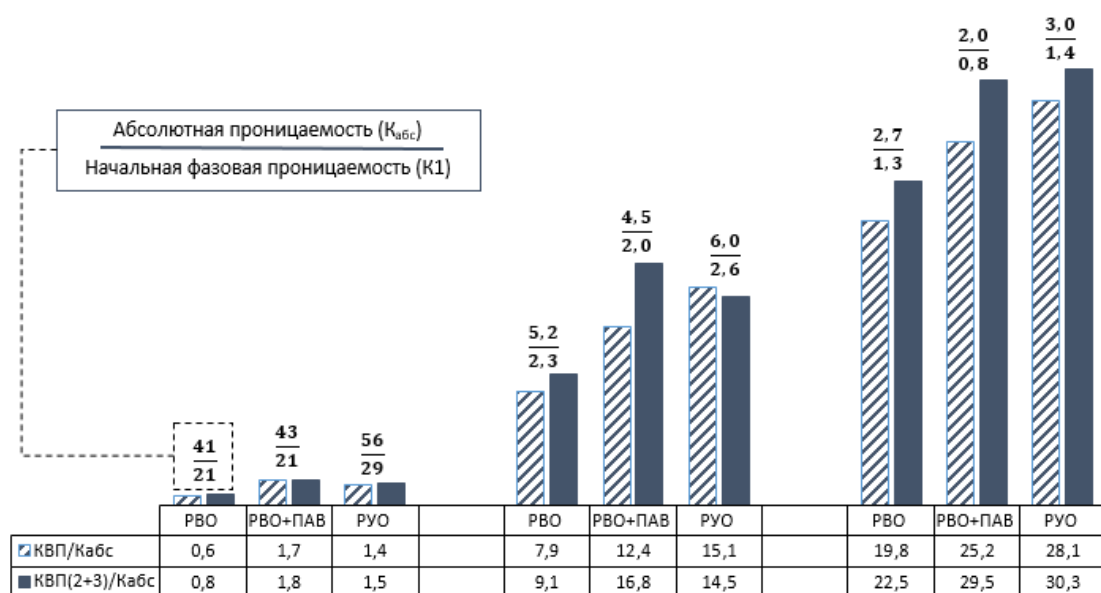


Рис. 2. Удельные коэффициенты восстановления проницаемости

Fig. 2. Specific permeability recovery factors

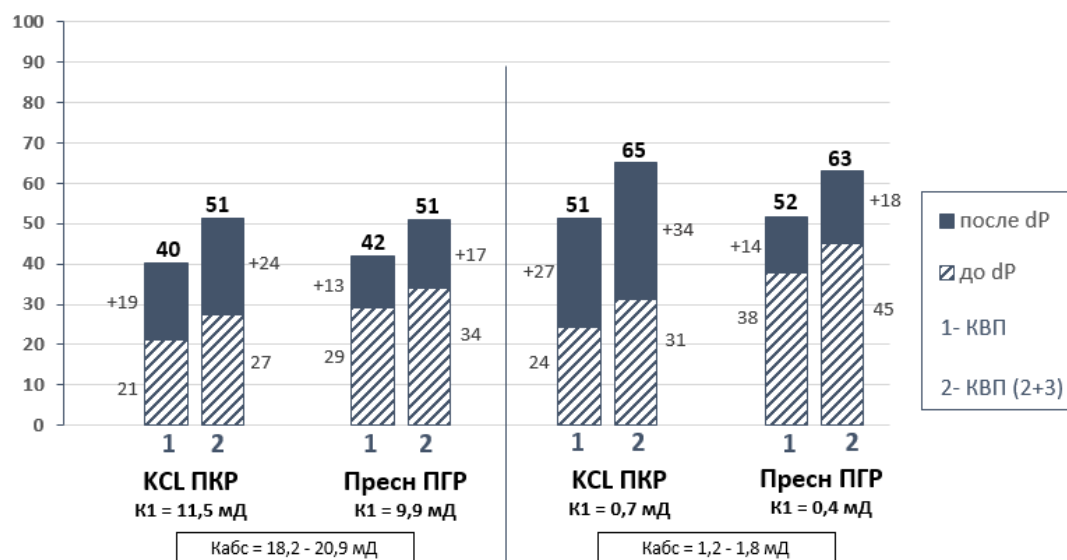


Рис. 3. Коэффициенты восстановления проницаемости с применением буровых растворов KCl и полимерглинистого ПГР

Fig. 3. Permeability recovery factors using KCl drilling fluids and polymer clay drilling

Согласно исследованиям [8, 20], в условиях низкой проницаемости пористой среды возникают нарушения линейного закона фильтрации Дарси при градиентах давления ниже предельных, причём с уменьшением проницаемости коллектора величина отклонения закона фильтрации от линейного становится более значительной. Данное обстоятельство в экспериментах на обратную проницаемость может сказаться на правильности определения начальной и конечной фазовой проницаемости.

Фильтрационные исследования на керне не воспроизводят реальные сроки воздействия и вызова притока, недостижимо воспроизведение в лабораторных условиях и перемещений инструмента, которые в определённой степени механически воздействуют на фильтрационную корку, что приводит к дополни-

тельному поступлению фильтрата вглубь пласта при возобновляемом формировании фильтрационной корки. Фракционный состав вводимого в буровой раствор колюматанта, который подбирается с помощью программного обеспечения, также меняется в процессе промывки скважины, происходит измельчение более крупных фракций. Законы идеальной упаковки колюматанта работают только в течение первых циклов циркуляции. В реальных скважинных условиях зона проникновения фильтрата значительна и играет определяющую роль в потере давления в приставочной зоне пласта. Важно оценивать влияние на ФЕС именно среды техногенной жидкости, тем более что как показали данные исследования, может сложиться ошибочное понимание в случае качественного подбора колюматанта.

Закключение

Сформулированы общие рекомендации по планированию фильтрационных исследований при подборе растворов первичного вскрытия:

- 1) изучать фильтраты буровых растворов или их модели. В данном случае допускается использование единичных образцов керна. При исследовании буровых растворов необходимо использовать составные модели с оценкой восстановления проницаемости по удаленной от колюматации части керна – КВП (2+3);

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ 39-235-89. Нефть. Методы определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации. – М.: ХОЗУ Миннефтепрома, 1989. – 35 с.
2. Abrams A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion // Society of Petroleum Engineers. – 1977. – № 5. – P. 8–15.
3. Dick M.A., Heinz T.J., Svoboda C.F. Optimizing the selection of bridging particles for reservoir drilling fluids // Society of Petroleum Engineers. – 2000. – № 2. – P. 3–8.
4. Kaeuffer M. Determination de l'optimum de remplissage granulometrique et quelques proprietes s'y rattachant // International Journal of Engineering. – 2019. – № 5. – P. 794–798.
5. Vickers S., Cowie M., Jones T. A new methodology that surpasses current bridging theories to efficiently seal a varied pore throat distribution as found in natural reservoir formations // AAE Fluids Conference. – Houston, Texas, April 11–12, 2006. – № 16. – P. 9–15.
6. Технология бурения горизонтальных скважин / Л.М. Левинсон, Ф.А. Агзамов, В.Г. Конесев, Ф.Х. Мухаметов. – Уфа: ООО «Монография», 2019. – 318 с.
7. King F.H. Principles and conditions of the movement of groundwater // U.S. Geological Survey. 19th Annual Report. P. 2. – 1898. – P. 59–297.
8. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low-permeability reservoirs / Xiong Wei, Lei Qun, Gao Shusheng, Hu Zhiming, Xue Hui // Petroleum exploration and development. – 2009. – V. 36. – № 2. – P. 232–236.
9. Некрасова И.Л. Совершенствование критериев оценки качества буровых растворов на углеводородной основе в зависимости от горно-геологических условий их применения // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18. – № 2. – P. 129–139.
10. Отечественные системы ЭБР для проводки скважин и вскрытия продуктивных пластов в сложных геологических условиях / Я.М. Курбанов, Т.В. Зайковская, Н.А. Черемисина, Г.Я. Курбанов, Н.В. Куприн // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 4. – P. 24–30.
11. Гаибназаров С.Б. Разработка новых химических реагентов для бурения на основе полисахаридов // Химическая промышленность. – 2018. – Т. 95. – № 6. – P. 299–303.
12. Optimizing filtrate design to minimize in-situ and wellbore damage to water-wet reservoirs during drill-in / Ch. Dalmazzone, A. Audibert, L. Quintero, T. Jones, C. Dewattines, M. Janssen // Society of Petroleum Engineers. – 2004. – № 01 – P. 12–20.
13. Zhang H., Marinescu P., Foxenberg W. Unique flow-back chemistry for enhancing productivity of low-permeability reservoir // Society of Petroleum Engineers. – 2012. – № 07 – P. 1–8.
14. Rane J.P., Liang Xu. Monitoring residual surfactant in the flow-back and produced water: a way forward to improve well productivity // Society of Petroleum Engineers. – 2014. – № 03. – P. 9–15.
15. Penny G.S., Pursley J.Th. Field studies of drilling and completion fluids to minimize damage and enhance gas production in unconventional reservoirs // Society of Petroleum Engineers. – 2007. – № 06. – P. 32–38.
16. Microemulsion-assisted fluid recovery and improved permeability to gas in shale formations / A.S. Zelenev, H. Zhou, L. Ellena, G.S. Penny // Society of Petroleum Engineers. – 2010. – № 2. – P. 12–16.
17. Петров Н.А. Применение комплексного реагента СНПХ ПКД-515 в нефтегазовых процессах // Нефтегазовое дело. – 2007. – № 2. – С. 01–11.
18. Повышение качества первичного и вторичного вскрытия нефтяных пластов / Н.А. Петров, В.Г. Султанов, И.Н. Давыдова, В.Г. Конесев. – СПб.: Изд-во «Недра», 2007. – 544 с.
19. Возможности сохранения продуктивности скважин на этапе их строительства / В.Г. Конесев, М.К. Рогачёв, Г.Ю. Коробов, Г.А. Тептерева // Бурение скважин в осложненных условиях: Материалы III Международной научно-практической конференции. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. – P. 57–59.
20. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Лабораторные фильтрационные исследования керна Приобского месторождения / В.А. Байков, А.В. Колонских, А.К. Макатров, М.Е. Политов, А.Г. Телин // Вестник ОАОНК «Роснефть». – 2013. – Вып. 31. – № 2. – P. 4–7.

Поступила 22.10.2020 г.

Информация об авторах

Конесев В.Г., кандидат технических наук, эксперт Управления бурения ООО «Газпромнефть НТЦ».

Четвертнева И.А., кандидат технических наук, руководитель Волго-Уральского региона ООО «Сервисный Центр СБМ».

Тептерева Г.А., доктор химических наук, доцент кафедры общей, аналитической и прикладной химии Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.24

PECULIARITIES OF METHODOLOGY FOR SELECTING SOLUTIONS OF PRIMARY OPENING OF PRODUCTIVE FORMATIONS BASED ON FILTRATION EXPERIMENTS ON CORE

Vasily G. Konesev¹,
Konesev.VG@gazpromneft-ntc.ru

Irina A. Chetvertneva²,
chetvertneva@ufa.scsbm.ru

Galina A. Teptereva³,
teptereva.tga@yandex.ru

¹ Gazpromneft NTC LLC,
75–79, Moika river embankment, St. Petersburg, 190000, Russia.

² LLC «Service Center SBM»,
15/1, Zavodskaya street, Ufa, 450005, Russia.

³ Ufa State Petroleum Technical University,
1, Kosmonatov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to form requirements for qualitative selection of process liquids for opening the productive formations in difficult mining and geological conditions related to the drilling of long-term frozen rocks. It is important to carry out experimental studies for evaluating the impact on filtration capacitive properties of core material selected at Polar oil-gas condensate deposit. This direction is relevant due to the need to preserve collector properties of productive formations and productivity of wells during their construction and development.

The main aim of the research is to form a list of recommendations for planning and conducting filtration studies on core material when assessing the influence of process liquids on the filtration and capacitive properties of rocks.

Objects: core material – sandstone fine-grained, aleuritic with signs of hydrocarbons; selected at Polar oil-gas condensate deposit; solutions of initial opening of various systems – on water and hydrocarbon bases; fresh polymer clay and KCl polymer carbonate drilling fluids.

Methods: study of the degree of damage of filtration-capacitive properties of the formation by various process liquids; estimation of values of recovery coefficients of initial permeability of core material taken at Polar oil-gas condensate deposit under different conditions, which are as close as possible to formation conditions by values of formation pressure and temperature.

Results. The authors have developed the list of recommendations for planning and conducting filtration studies on the core during selection of process fluids for formation opening. Real examples show the key points of the methodology, in case of non-compliance of which it is possible to obtain an erroneous understanding of conformity or non-conformity of the tested process liquids to the opened objects of operation.

Key words:

Drilling mud, primary opening, filtration-capacitive properties, productive formation, restoration of permeability, core material, efficiency, filtrate, depression, kolmatant.

REFERENCES

- OST 39-235-9-89. *Neft. Metody opredeleniya fazovukh pronitsaemostey v laboratornykh usloviyakh pri sovmestnoy stacionarnoy filtratsii* [Industry standard 39-235-89. Oil. Methods for determining phase permeability in laboratory conditions in co-stationary filtering]. Moscow, Minnefteprom Publ., 1989. 35 p.
- Abrams A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion. *Society of Petroleum Engineers*, 1977, no. 5, pp. 8–15.
- Dick M.A., Heinz T.J., Svoboda C.F., Aston M. Optimizing the selection of bridging particles for reservoir drilling fluids. *Society of Petroleum Engineers*, 2000, no. 2, pp. 3–8.
- Kaeuffer M. Determination de L'Optimum de Remplissage Granulometrique et Quelques Proprietes S'y Rattachant. *International Journal of Engineering*, 2019, no. 5, pp. 794–798.
- Vickers S., Cowie M., Jones T. A new methodology that surpasses current bridging theories to efficiently seal a varied pore throat distribution as found in natural reservoir formations. *AADE Fluids Conference*. Houston, Texas, April 11–12, 2006. No. 16, pp. 9–15.
- Levinson L.M., Agzamov F.A., Konesev V.G., Mukhametov F.H. *Tekhnologiya burniya gorizontalnukh skvazhin* [Technology of drilling the horizontal wells]. Ufa, Monografiya Publ., 2019. 318 p.
- King F.H. Principles and conditions of the movement of groundwater. *U.S. Geological Survey. 19th Annual Report*. P. 2. 1898. pp. 59–297.
- Xiong Wei, Lei Qun, Gao Shusheng, Hu Zhiming, Xue Hui. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low-permeability reservoirs. *Petroleum exploration and development*, 2009, vol. 36, no. 2, pp. 232–236.
- Nekrasova I.L. Improvement of the criteria for assessing the quality of hydrocarbon-based muds in terms of geological conditions of their use. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 129–139. In Rus.
- Kurbanov Ya.M., Zaykovskaya T.V., Cheremisina N.A., Kurbanov G.Ya., Kuprin N.V. National systems of emulsion drilling solutions (EDS) for wells drilling and productive formations opening in complex geological conditions. *Journal: Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2019, no. 4, pp. 24–30. In Rus.
- Gaibnazarov S.B. Development of new chemical reagents for drilling on the basis of polysaccharides. *Journal: Chemical industry*, 2018, vol. 95, no. 6, pp. 299–303. In Rus.
- Dalmazzone Ch., Audibert A., Quintero L., Jones T., Dewatines C., Janssen M. Optimizing filtrate design to minimize in-situ and wellbore damage to water-wet reservoirs during drill-in. *Society of Petroleum Engineers*, 2004, no. 01, pp. 12–20.
- Zhang H., Marinescu P., Foxenberg W. Unique flow-back chemistry for enhancing productivity of low-permeability reservoir. *Society of Petroleum Engineers*, 2012, no. 07, pp. 1–8.

14. Rane J.P., Liang Xu. Monitoring residual surfactant in the flow-back and produced water: A way forward to improve well productivity. *Society of Petroleum Engineers*, 2014, no. 03, pp. 9–15.
15. Penny G.S., Pursley J.Th. Field studies of drilling and completion fluids to minimize damage and enhance gas production in unconventional reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*, 2007, no. 06, pp. 32–38.
16. Zelenev A.S., Hui Zhou, Linda Ellena, Penny G.S. Microemulsion-assisted fluid recovery and improved permeability to gas in shale formations. *Society of Petroleum Engineers*, 2010, no. 2, pp. 12–16.
17. Petrov N.A. Primenenie kompleksnogo reagenta SNPH PKD-515 v neftegazovykh protsessakh [Application of complex agent SNPH PKD-515 in oil and gas processes]. *Neftegazovoe delo*, 2007, no. 2, pp. 1–11.
18. Petrov N.A., Sultanov V.G., Davydova I.N., Konesev V.G. *Povyshenie kachestva pervichnogo i vtorichnogo vskrytiya neftyanukh plastov* [Improvement of quality of primary and secondary opening of oil reservoirs]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2007. 544 p.
19. Konesev V.G., Rogachev M.K., Korobov G.Yu., Teptereva G.A. Vozmozhnosti sokhraneniya produktivnosti skvazhin na etape ikh stroitelstva [Possibilities of maintaining productivity of wells at the stage of their construction]. *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Burenie skvazhin v oslozhnennukh usloviyakh* [Materials of the III International Scientific and Practical Conference. Drilling Wells in Complicated Conditions]. St.-Petersburg, St.-Petersburg Mining University Publ., 2018. pp. 57–59.
20. Baykov V.A., Kolonsky A.V., Makatrov A.K., Politov M.E., Telin A.G. Nelineynaya filtratsiya v nizkopronizaemykh kollektorakh. Laboratornye filtratsionnye issledovaniya kerna Priobskogo mestorozdeniya [Nonlinear filtration in low-permeable collectors. Laboratory filtration investigations of Priobskoe field]. *Vestnik OA ONK «Rosneft»*, 2013, no. 2, pp. 4–7.

Received: 22 October 2020.

Information about the authors

Vasily G. Konesev, Cand. Sc., expert, Gazpromneft NTC LLC.

Irina A. Chetvertneva, Cand. Sc., head of Volga-Ural Region LLC «Service Center SBM».

Galina A. Teptereva, Dr. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technical University.

УДК 622.24.051.64

ГИДРОДИНАМИКА ПРИ БУРЕНИИ ИМПРЕГНИРОВАННЫМ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ С ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ТОРЦА МАТРИЦЫ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Петенев Павел Геннадьевич¹,
pavel-whait@mail.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
alleniram83@mail.ru

Комаровский Игорь Андреевич¹,
igorkomarovskij702@gmail.com

Головченко Антон Евгеньевич¹,
antong77@yandex.ru

Лиу Баочанг²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета,
Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

² Университет Цзилинь,
Китай, 130026, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

Актуальность. К проектированию современного породоразрушающего инструмента выдвигаются высокие требования. Востребованным является буровой инструмент, за счет конструкции которого решается большая часть задач бурения: соблюдение запроектированной траектории ствола скважины, высокая скорость проходки и ресурс, эффективное разрушение горной породы, качество отбора керна и так далее. Зачастую, решая путем изменения конструктивных элементов инструмента одну проблему, разработчики не учитывают другую, которая может оказаться не менее значимой. Так, разработка импрегнированной коронки с эксцентриситетом режущей части торца матрицы позволила значительно уменьшить интенсивность естественного искривления, которое особо актуально при бурении в анизотропных горных породах. Однако изменение конструкции коронки повлекло за собой снижение ресурса инструмента. На необходимость комплексного, системного подхода к исследованию механизма работы бурового инструмента авторами указывалось неоднократно. В связи с этим, учитывая преимущество полученной конструкции в области стабилизации направления ствола скважины, актуальным является исследование причин скорого износа таких коронок. Основной причиной износа алмазного инструмента является перегрев и зашламование режущей части, поэтому при конструировании любого алмазного породоразрушающего инструмента необходимо дополнительно исследовать гидродинамические процессы, протекающие при его работе на забое скважины.

Цель: определение особенностей течения жидкости в пределах импрегнированного породоразрушающего инструмента, выделение основных причин износа матрицы, связанных с гидродинамикой на забое, а также конструктивные решения намеченных проблем.

Объекты: процесс гидродинамики бурения импрегнированным породоразрушающим инструментом.

Методы: компьютерное моделирование, аналитические исследования, анализ.

Результаты. Изменение конструкции торца матрицы импрегнированной коронки в сторону смещения равномерности размещения секторов приводит к неравномерному распределению очистного агента в рабочей зоне инструмента. Как следствие, наиболее зашламованные сектора хуже омываются жидкостью и быстрее изнашиваются. Для реализации поставленной задачи – эксцентриситета режущей части торца матрицы с высоким ресурсом, предложены варианты конструктивного исполнения торца импрегнированной коронки.

Ключевые слова:

Импрегнированный породоразрушающий инструмент, эксцентриситет режущей части торца матрицы, гидродинамика в процессе бурения, промывочная система бурового инструмента, компьютерное моделирование.

Введение

На сегодняшний день большая часть буриемых геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые бурится с применением снарядов со съемным керноприемником (ССК). В связи с тем, что средняя глубина геологоразведочных скважин в последнее время неуклонно растет, все чаще возникает проблема невыполнения скважиной своей геологической

задачи по причине высоких интенсивностей естественного искривления скважин [1–19].

Одним из путей решения данной проблемы является использование клиновых отклонителей или отклонителей непрерывного действия (ОНД). Однако для существенного изменения траектории при использовании клиновых отклонителей требуется большое число их постановок, что существенно ска-

зывается на материальных и трудовых затратах. В случае использования ОНД в скважинах, буримых с ССК, на первый план выходит недостаток большинства конструкций ОНД, связанный с высокой интенсивностью набора кривизны и невозможностью ее регулировки в процессе бурения [1–6].

В этом случае перспективным направлением является развитие стабилизирующих технических средств, способных снижать интенсивность естественного искривления за счет особенностей своей конструкции.

Одним из примеров таких конструкций служат конструкции алмазных импрегнированных коронок фирм *Atlas Copco* и *Boart Longyear* [20, 21]. Основной идеей таких инструментов является уменьшение площади торца породоразрушающего инструмента с тем, чтобы добиться снижения осевого усилия без потерь производительности бурения. Снижение осевой нагрузки, в свою очередь, снижает прогиб колонкового набора и позволяет снизить кривизну скважин.

К таким техническим средствам также относится импрегнированный алмазный породоразрушающий инструмент (ПРИ) с эксцентриситетом режущей части торца матрицы. Принцип действия такого ПРИ основан на неравномерно распределенных силах сопротивления резанию–скалыванию породы в процессе бурения. Обеспечивается это неравномерным распределением резцов в торце матрицы породоразрушающего инструмента. Неуравновешенные силы сопротивления резанию–скалыванию породы в итоге задают вид вращения ПРИ вокруг оси скважины, что позволяет даже в условиях перекоса ПРИ на забое сохранять контакт со стенками скважины боковому вооружению коронки и не производить более интенсивного фрезерования одной из сторон стенки скважины с формированием кривизны [1–7].

Постановка проблемы

Исследования в области бурения требуют научных подходов с учетом всех параметров, влияющих на систему [22, 23].

Простейшим образцом подобного стабилизирующего породоразрушающего инструмента может служить стандартная импрегнированная коронка с удаленными в определенном порядке сегментами. При производственных испытаниях экспериментальных образцов коронок с эксцентриситетом режущей части матрицы на месторождении «Попутнинское», изготовленных из стандартных коронок типоразмера НQ (рис. 1) [2], были получены положительные результаты в виде уменьшения интенсивности естественного искривления скважин в 3,2 раза, повышения механической скорости бурения на 20 %, снижения общего числа подклинов. Однако в ходе производственных испытаний также наблюдалось снижение ресурса ПРИ, которое нельзя объяснить лишь общим снижением площади торца матрицы.

Удаление двух рабочих секторов привело к неравномерному распределению площади промывочных каналов и, как следствие, к нарушению баланса гидравлических сопротивлений. В результате перепада давления жидкости на торце испытуемой коронки

основная часть промывочного агента устремилась в область больших по ширине промывочных каналов, а малые каналы стали испытывать недостаток жидкости для охлаждения и очистки инструмента.

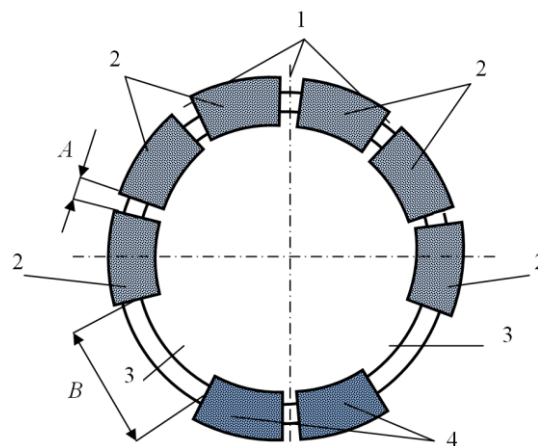


Рис. 1. Конструкция матрицы экспериментальной коронки типа КИТ с эксцентриситетом режущей части: 1 – промывочные окна меньшей ширины; 2 – рабочие сектора; 3 – широкие промывочные окна; 4 – более твердые алмазные сектора

Fig. 1. Design of the matrix of an experimental diamond core (KIT) for drilling anisotropic rocks: 1 – narrow flushing channels with a width of A; 2 – wide flushing sectors with a width of B; 3 – diamond-containing sectors; 4 – harder diamond sectors

Методика

Давление промывочного агента в каналах геолого-разведочной буровой коронки, не учитывая потери давления в соединениях буровых труб, можно выразить в общем виде согласно зависимости (1) [24, 25]:

$$P_3^{\text{вх}} = P_n + \rho g H - \Delta P, \quad (1)$$

где $P_3^{\text{вх}}$ – давление на забое на входе в промывочный канал; P_n – давление, создаваемое буровым насосом; ρ – плотность промывочного агента; H – высота столба промывочной жидкости; ΔP – перепад давления на выходе из промывочных каналов коронки; g – ускорение свободного падения.

Значение ΔP выразим через формулу расхода промывочного агента (2):

$$Q = \mu f \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент расхода жидкости (0,82); f – площадь промывочного канала; ρ – плотность промывочного агента.

С учетом суммы площади всех каналов стандартной коронки расход промывочной жидкости имеет вид выражения (3):

$$Q_{\text{ст}} = \mu \Sigma f \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{ст}}}{\rho}}, \quad (3)$$

где $\Sigma f = f_M n$, f_M – площадь стандартного для коронки КИТ промывочного канала; n – количество промывочных каналов.

Отсюда можно получить значение $\Delta P_{\text{ст}}$ согласно выражению (4):

$$\Delta P_{\text{ст}} = \frac{\left(\frac{Q}{\mu \Sigma f} \right)^2 \rho}{2}. \quad (4)$$

После удаления двух секторов коронки формула (2) приобретет вид (5):

$$Q_{\text{изм}} = \mu \Sigma F \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{изм}}}{\rho}}, \quad (5)$$

где суммарная площадь промывочных каналов $\Sigma F = f_M(n-4) + F_6 \cdot 2$, F_6 – площадь большого канала.

Тогда $\Delta P_{\text{изм}}$ можно определить по формуле (6):

$$\Delta P_{\text{изм}} = \frac{\left(\frac{Q}{\mu \Sigma F} \right)^2 \rho}{2}. \quad (6)$$

Таким образом, изменение давления при бурении коронкой с эксцентриситетом режущей части по сравнению со стандартной коронкой будет равно

$$P_3^{\text{вх}} = P_{\text{н}} + \rho g H - \Delta P_{\text{изм}}.$$

Следовательно $\Delta P_{\text{ст}} > \Delta P_{\text{изм}}$, что указывает на уменьшение гидравлических сопротивлений, которые испытывает промывочный агент в коронке с эксцентриситетом торца. Распределение давления жидкости в пределах торца коронки в этом случае можно представить в виде эпюры, следующим образом (рис. 2).

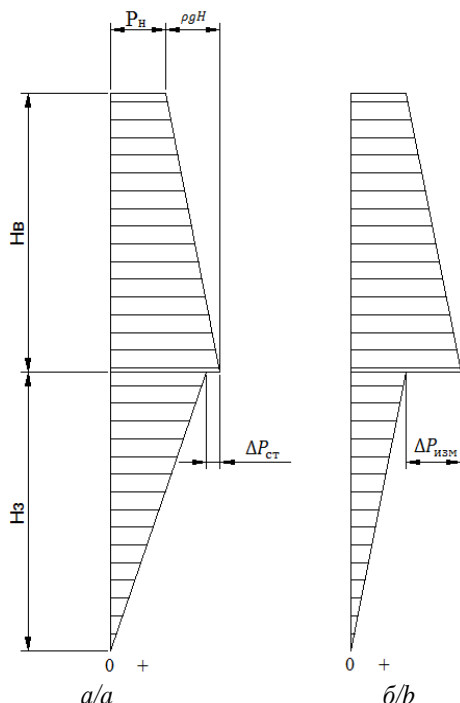


Рис. 2. Эпюра распределения давления: а) стандартная коронка; б) испытываемая коронка; H_6 – длина внутритрубно пространства; H_3 – затрубное пространство

Fig. 2. Diagram of pressure distribution using: a) a standard crown; b) a prototype crown; H_6 – well depth (in-pipe space); H_3 – annulus

Таким образом, учитывая геометрию исследуемых образцов импрегнированных коронок (КИТ, типоразмер HQ), изменение площади торца матрицы (F), отведенной на промывку забоя, с 450 мм² (стандартная коронка) до 770 мм², привело к тому, что большая часть этой величины, а именно 500 мм², приходится на площадь больших по ширине (В, рис. 1) промывочных каналов, и только 270 мм² относится к промывочным каналам меньшей ширины (А, рис. 1).

Общее значение количества жидкости, проходящей через промывочный канал при бурении стандартной коронкой, будет выглядеть следующим образом

$$Q_{f_M} = \frac{Q_{\text{ст}}}{\Sigma f} f_M.$$

И для коронки типоразмера HQ составит 4 л/мин.

А при бурении испытываемой коронки КИТ с эксцентриситетом режущей части матрицы:

$$Q_{f_M} = \frac{Q_{\text{изм}}}{\Sigma F} f_M.$$

И для того же типоразмера составит 2,34 л/мин.

В результате изменения геометрии торца матрицы, на 41,5 % уменьшилось количество жидкости, проходящей через промывочные каналы меньшей ширины.

Полученные значения определены в условиях равенства распределения давления между промывочными каналами (рис. 3, а). При том можно предположить, что давление будет распределяться по торцу коронки неравномерно (рис. 3, б), преобладавая в одних окнах и, возможно, сильно снижаясь в других, что также влияет на картину распределения промывочного агента на забое скважины.

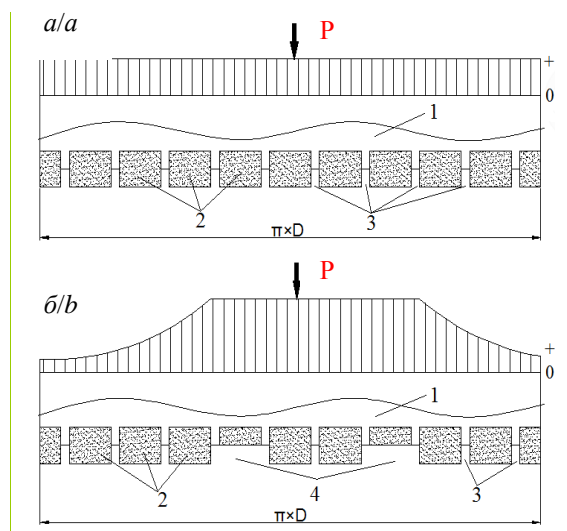


Рис. 3. Разверстка боковой поверхности коронок: а) стандартной коронки; б) испытываемого образца коронки КИТ; 1 – корпус; 2 – сектора; 3 – малые промывочные каналы; 4 – большие промывочные каналы

Fig. 3. Reamer of a side surface of the crowns: a) standard diamond crown; b) layout of the KIT crown; 1 – crown body; 2 – diamond-containing sectors; 3 – small flushing channels; 4 – large flushing channels

Таким образом, при недостаточном количестве промывочной жидкости в пределах малых промывочных каналов в процессе экспериментального бурения внутренняя поверхность алмазосодержащих секторов матрицы недостаточно охлаждалась и очищалась от шлама. Налипание шлама, уменьшая проходное отверстие из-за отсутствия малых каналов, усугубляло ситуацию и в конечном итоге привело к повышенному износу данной части матрицы. Что способствовало уменьшению ресурса коронки.

Изучение точной картины распределения давления и расхода очистного агента через неравные по ширине каналы требует дополнительных исследований, которые затруднительны в производственных условиях. В связи с этим были разработаны трехмерные модели, позволяющие произвести компьютерное моделирование гидродинамических процессов, протекающих на забое при бурении скважин импрегнированными коронками, отличающимися конструкцией торца.

На первом этапе для сравнения приняты модели импрегнированных коронок КИТ типоразмера НQ. Различаются полученные модели количеством и расположением секторов матрицы (рис. 4). Первая модель содержит десять секторов, равномерно расположенных по торцу коронки (рис. 4, а), вторая имеет восемь секторов, расположенных неравномерно, с целью создания эксцентриситета (рис. 4, б).

Задача реализуется методом конечных элементов. Для составляемых моделей исходными данными выбраны конструктивные параметры коронки КИТ и режимы бурения. Каждая составляемая модель состоит из домена промывочной жидкости, форма которой полностью повторяет промывочную систему выбранной импрегнированной коронки в забойной зоне скважины. Каждая модель реализует прямую промывку скважины.

Составленные 3D модели позволяют определять скорость течения и давление очистного агента в любой точке призабойной зоны. В качестве начальных условий выступают исходное направление жидкости и относительное давление равно 0. Разработанные

модели учитывают вращение коронки относительно элементов скважины (стенок, забоя, керна), а также его влияние на течение жидкости.

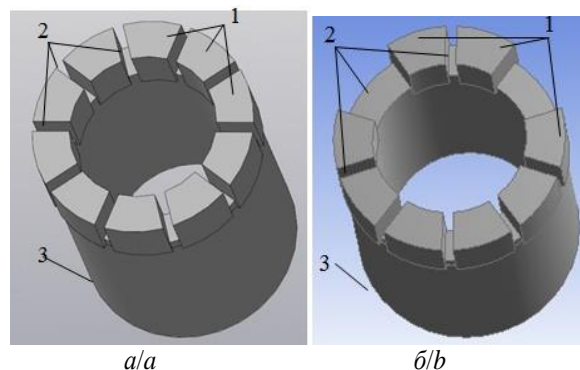


Рис. 4. Модель исследуемой конструкции коронки: а) серийно-выпускаемая коронка КИТ типоразмера НQ; б) коронка с эксцентриситетом режущей части торца матрицы: 1 – сектор; 2 – промывочное окно; 3 – корпус

Fig. 4. Model of the investigated crown design: a) commercially available KIT crown of size HQ; b) crown with an eccentricity of the cutting part of the matrix end face: 1 – sector; 2 – flushing window; 3 – housing

Моделирование проводилось для условий бурения при частоте вращения 1000 об/мин, а подача промывочной жидкости варьировалась в пределах 40–70 л/мин.

Анализ

Результаты моделирования подтвердили, что при бурении коронкой с эксцентриситетом режущей части торца матрицы основная масса потока очистного агента уходит в область удаленных сегментов (рис. 5). Жидкость попадает в промывочные окна между имеющимися секторами коронки, однако скорость ее течения в 2 раза меньше, чем в области удаленных сегментов (рис. 5, в).

Подаваемая на забой жидкость при бурении коронкой КИТ распределяется равномерно, в равных частях между секторами матрицы (рис. 6).

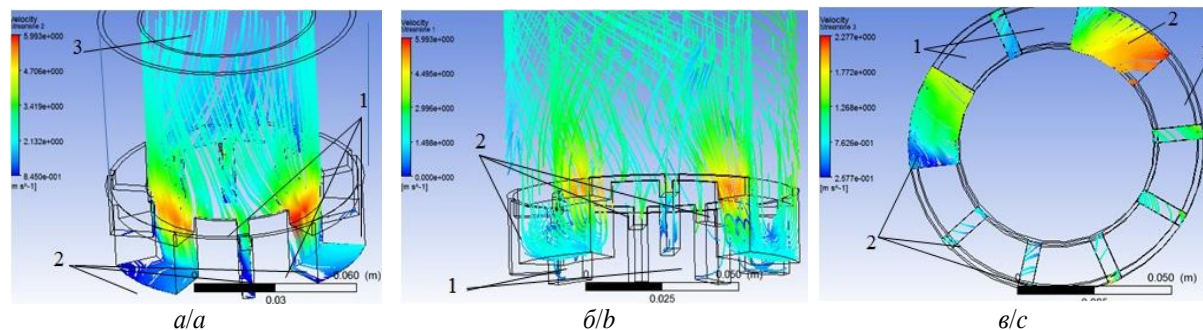


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования. Скорость течения жидкости в забойной зоне при бурении импрегнированной коронкой с эксцентриситетом режущей части торца матрицы: а) течение жидкости в зоне контакта с керном; б) течение жидкости в промывочной системе коронки; в) течение жидкости на торце коронки (1 – сектор; 2 – промывочное окно; 3 – керна)

Fig. 5. Computer simulation results. The fluid flow rate in the bottomhole zone when drilling with an impregnated crown with an eccentricity of the cutting part of the matrix end face: a) fluid flow in the core contact zone; b) fluid flow in the flushing system of the crown; c) fluid flow at the end of the crown (1 – sector; 2 – flushing window; 3 – core)

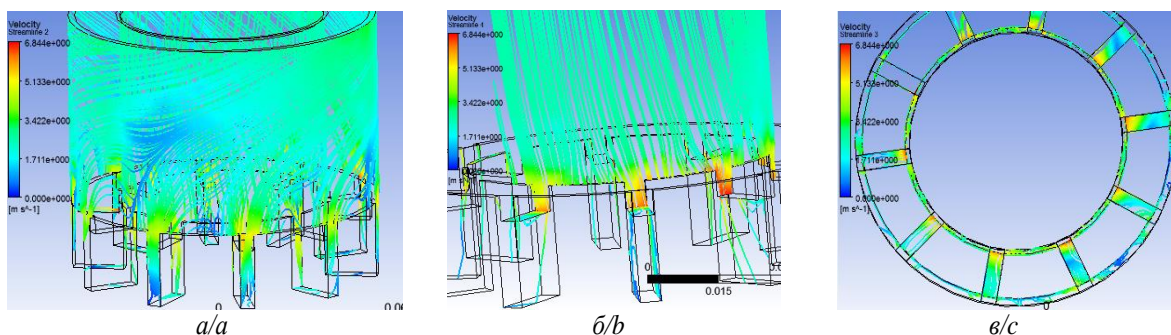


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования. Скорость течения жидкости в забойной зоне при бурении импрегнированной коронкой типа КИТ: а) течение жидкости в промывочной системе коронки; б) течение жидкости в зоне контакта с керном; в) течение жидкости на торце коронки

Fig. 6. Computer simulation results. The fluid flow rate in the bottomhole zone when drilling with an impregnated crown KIT: а) fluid flow in the flushing system of the crown; б) fluid flow in the core contact zone; в) fluid flow at the end of the crown

Зафиксировано интересное явление. В условиях высокочастотного бурения, а также в связи с малыми размерами зазоров, где протекает очистной агент, на течение жидко-

сти во многом оказывает влияние направление вращения ПРИ (рис. 7), что подтверждает выводы, сделанные для однослойного алмазного колонкового ПРИ в работе [26].

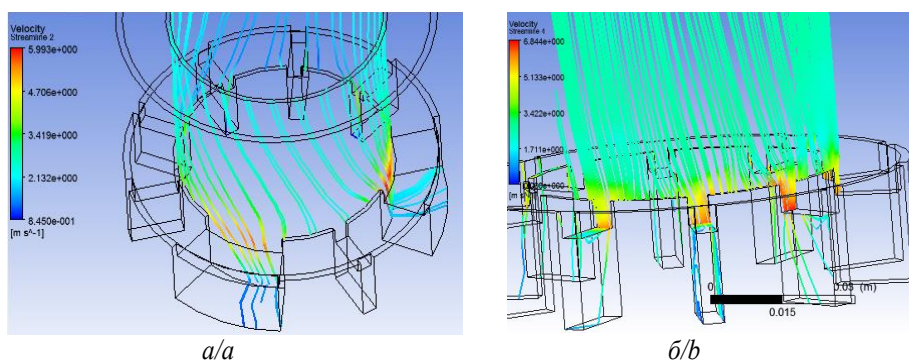


Рис. 7. Течение жидкости между керном и коронкой: а) коронка с эксцентриситетом; б) коронка типа КИТ

Fig. 7. Fluid flow between core and crown: а) crown with an eccentricity; б) KIT crown

Зоной наибольшего давления исследуемой модели является зазор между керном и кернообразующей частью коронки. В коронке с равномерно расположенными секторами промывочные окна имеют одинаковые геометрические размеры и таким образом при попадании в торцевую часть давление жидкости перераспределяется одинаково по всем промывочным окнам (рис. 8).

Использование конструкции коронки с эксцентриситетом режущей части торца приводит к тому, что при достижении области торцевых промывочных окон основная масса очистного агента устремляется в зону наименьших гидравлических сопротивлений и поступает в места удаления сегментов. Здесь наблюдается резкое падение давления жидкости, в то время как в меньших по размерам промывочных окнах давление в 1,5 раза больше (рис. 9).

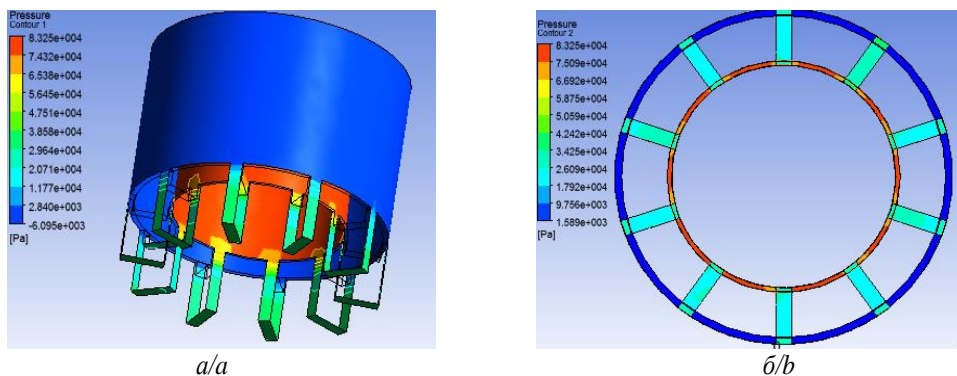


Рис. 8. Результаты компьютерного моделирования. Давление жидкости в забойной зоне при бурении импрегнированной коронкой КИТ: а) в пределах тела коронки; б) на торце коронки

Fig. 8. Computer simulation results. Liquid pressure in the bottomhole zone when drilling with an impregnated bit KIT: а) within the body of the crown; б) at the end of the crown

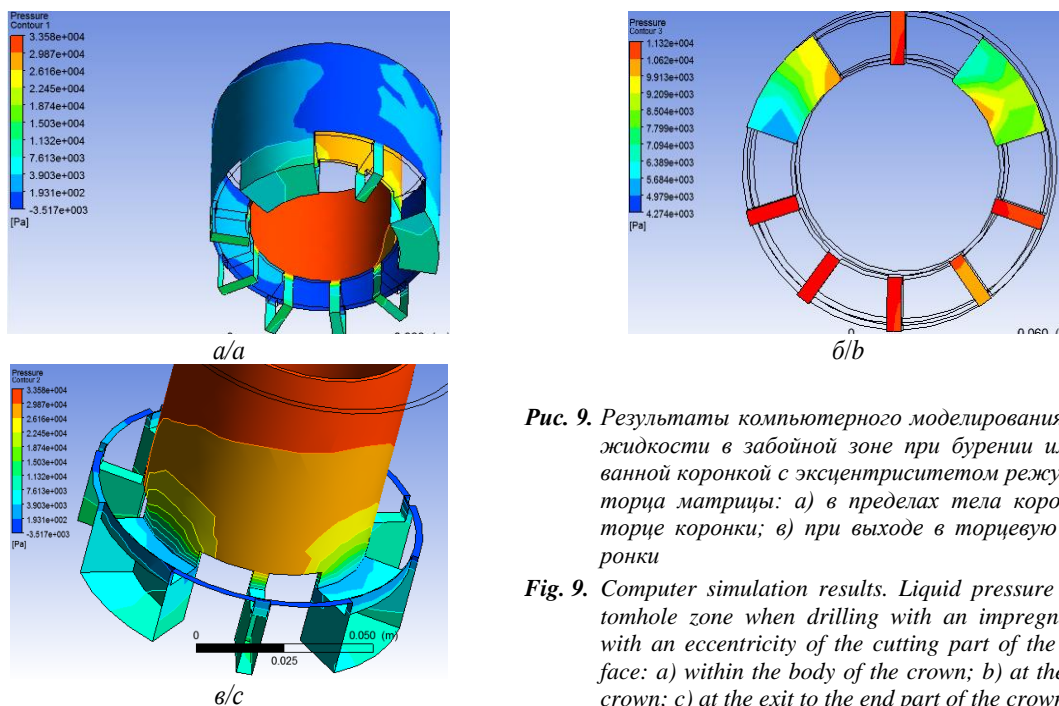


Рис. 9. Результаты компьютерного моделирования. Давление жидкости в забойной зоне при бурении импрегнированной коронкой с эксцентриситетом режущей части торца матрицы: а) в пределах тела коронки; б) на торце коронки; в) при выходе в торцевую часть коронки

Fig. 9. Computer simulation results. Liquid pressure in the bottomhole zone when drilling with an impregnated crown with an eccentricity of the cutting part of the matrix end face: a) within the body of the crown; b) at the end of the crown; c) at the exit to the end part of the crown

Таким образом, в связи с повышенным давлением и малой скоростью течения жидкости в промывочных окнах между секторами, на которые приходится основная часть работы по разрушению горной породы, происходит слабая очистка и охлаждение этих секторов очистным агентом. Сектора быстрее изнашиваются, с чем собственно и связано снижение ресурса коронки, зафиксированное при производственных испытаниях.

Основным недостатком конструкции импрегнированной коронки с эксцентриситетом режущей части

торца, достигнутого путем удаления сегментов матрицы, является режим неравномерного распределения потока очистного агента в забойной зоне. Учитывая важность сохранения равных гидравлических сопротивлений в торце стабилизирующего ПРИ разработан и предложен целый ряд конструкций породоразрушающих инструментов, способных реализовывать вращение инструмента вокруг оси скважины с сохранением гидравлических сопротивлений в его торце. Некоторые из защищенных патентами РФ [27, 28] конструкций представлены на рис. 10.

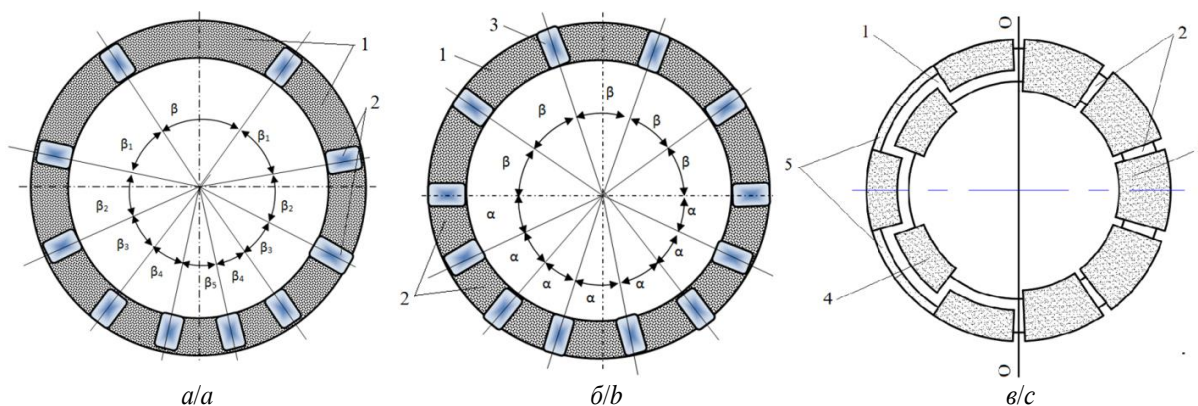


Рис. 10. Конструкции динамически стабилизирующего инструмента, защищенные патентами РФ: а) коронка с различными углами обхвата β ; β_1 ; β_2 ; β_3 ; β ; β : 1 – алмазосодержащие секторы, 2 – промывочные каналы; б) коронка с двумя различными углами обхвата α и β : 1 – большие алмазосодержащие секторы, 2 – малые алмазосодержащие секторы, 3 – промывочные каналы; в) коронка с неравными по диаметру алмазосодержащими каналами: 1 – корпус, 2 – промывочные каналы, 3 – стандартные алмазосодержащие секторы, 4 – малые алмазосодержащие секторы, 5 – стабилизирующий пояс

Fig. 10. Designs of a dynamically stabilizing tool protected by patents of the Russian Federation: a) crown with different angles of coverage β ; β_1 ; β_2 ; β_3 ; β ; β : 1 – diamond-containing sectors, 2 – flushing channels; b) crown with two different grasping angles α and β : 1 – large diamond-containing sectors, 2 – small diamond-containing sectors, 3 – flushing channels; c) crown with diamond-containing channels of unequal diameter: 1 – body, 2 – flushing channels, 3 – standard diamond-containing sectors, 4 – small diamond-containing sectors, 5 – stabilizing belt

Выводы

1. Конструкция импрегнированной коронки с удаленными сегментами позволяет добиться эксцентриситета режущей части торца матрицы, что способствует борьбе с естественным искривлением скважины, однако при этом обладает недостатком снижения ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 328 с.
2. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах / В.В. Нескоромных, П.Г. Петенёв, А.Л. Неверов, П.С. Пушмин, Г.Р. Романов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 326. – № 4. – С. 30–40.
3. Tretyak A.A., Shvec V.V. The new type of strainer construction // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019 / Ed. by V.S. Litvinenko. – London: Taylor & Francis Group, 2020. – V. 2. – P. 925–929.
4. Ларин А.А. Исследование процесса взаимодействия алмазного породоразрушающего инструмента с анизотропной горной породой с целью выявления закономерностей естественного искривления скважин: дис. ... канд. наук. – Томск, 2000. – 192 с.
5. Нескоромных В.В. Искривление скважин в анизотропных горных породах – Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. – 199 с.
6. Пушмин П.С. Обоснование модели алмазной коронки на основе исследования механики разрушения твердых анизотропных пород: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2006. – 131 с.
7. 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.
8. Borehole stability analysis: a new model considering the effects of anisotropic permeability in bedding formation based on poroelastic theory / L. Ding, Z. Wang, B. Liu, J. Lv // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – V. 69. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102932> (дата обращения 03.03.2020).
9. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – V. 37 (13). – P. 1913–1929.
10. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39 (1). – P. 41–58.
11. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 113. – P. 11–23.
12. Bobet A. Lined circular tunnels in elastic transversely anisotropic rock at depth // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2011. – V. 44 (2). – P. 149–167.
13. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – V. 35 (3). – P. 141–160.
14. Алиев А.А., Исмагилова З.Ф., Улышина К.Ф. Определение прочностных характеристик анизотропных пород при сдвиге по результатам трехосного сжатия // Нефтепромысловое дело. – 2016. – № 9. – С. 25–28. URL: <https://rucont.ru/efd/472642> (дата обращения 28.02.2020).
15. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: НТЛ, 1999. – 240 с.
16. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. 1. – С. 463–465.
17. Fracture pressure model for inclined wells in layered formations with anisotropic rock strengths / T. Ma, Q.B. Zhang, P. Chen, C. Yang, J. Zhao // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 149. – P. 393–408.
18. Houali A., Tiab D. Analysis of interference testing of horizontal wells in an anisotropic medium // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, APOGCE SPE 88537. – Perth, Australia, 2004. – P. 725–734.
19. Seismic anisotropy in mid to lower orogenic crust: Insights from laboratory measurements of Vp and Vs in drill core from central Scandinavian Caledonides / Q.C. Wenning, B.S.G. Almqvist, P. Hedin, A. Zappone // Tectonophysics. – 2016. – V. 692. – P. 14–28.
20. Atlas Copco company. Drilling equipment for the production of geological exploration and engineering survey works. Catalog. – 2016. URL: <http://www.atlascopco.us/usus/products/drilling-tools/1527859/> (дата обращения 03.03.2020).
21. Boart Longear. Catalog of diamond products. – 2015. URL: <http://www.boartlongear.com/drilling-equipment/catalogs/> (дата обращения 03.03.2020).
22. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 96–97. – P. 109–119.
23. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 30 (2). – P. 145–164.
24. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
25. Буровые промысловые жидкости. Буровые растворы на водной основе / А.О. Николаев, А.Л. Неверов, А.В. Минеев, А.В. Гусев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 156 с.
26. Попова М.С., Остапук А.Ю. Течение жидкости на забое скважины при бурении алмазной однослойной коронкой // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Ч. I. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. – С. 87–89.
27. Алмазная коронка для бурения: пат. РФ № 171734 Российская Федерация, МПК Е 21 В 10/48. Заявл. 09.01.2017; опубл. 13.06.2017. – 7 с.
28. Алмазная коронка для бурения: пат. РФ № 161061 Российская Федерация, МПК Е 21 В 10/48. Заявл. 01.12.2015; опубл. 10.04.2016. – 6 с.

Поступила 22.10.2020 г.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

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, старший преподаватель кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Комаровский И.А., старший лаборант 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.

Баочанг Л., профессор геоинженерии кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.

UDC 622.24.051.64

HYDRODYNAMICS WHEN DRILLING WITH AN IMPREGNATED DIAMOND TOOL WITH THE ECCENTRICITY OF THE CUTTING PART OF THE END FACE OF THE DRILLING TOOL MATRIX

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

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

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Igor A. Komarovskiy¹,
igorkomarovskij702@gmail.com

Anton E. Golovchenko¹,
antong77@yandex.ru

Liu Baochang²,
liubc@jlu.edu.cn

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

² Jilin University,
938, Ximinzhong street, Changchun, 130026, China.

Relevance. High requirements are put forward for the design of modern rock-cutting tools. A drilling tool is in demand, due to the design of which most of the drilling tasks: compliance with the projected trajectory of the wellbore, high drilling speed and resource of the drilling tool, effective destruction of rock, quality of core selection, etc. are solved. Often, when solving one problem by changing the structural elements of the tool, developers do not take into account another one, which may be no less significant. Thus, the development of a diamond tool with the eccentricity of the cutting part of the matrix end has significantly reduced the intensity of natural curvature of wells, which is especially important when drilling in anisotropic rocks. However, the change in the design of the diamond tool resulted in a reduction in the tool's life. The authors have repeatedly pointed out the need for a comprehensive approach to the study of the mechanism of the drilling tool operation. In this regard, given the advantage of the resulting design in the field of regulating the well curvature, it is relevant to study the causes of rapid wear of such a drilling tool. The main reason for wear of a diamond tool is overheating and sludge bounding of the cutting part, so when designing any diamond drilling tool, it is necessary to further investigate the hydrodynamic processes occurring during its operation at the bottom of the well.

The purpose of research is to determine the characteristics of the drilling mud flow within the diamond tool, to identify the main causes of matrix wear associated with hydrodynamics at the bottom, as well as design solutions to the problems identified.

Objects: hydrodynamics of drilling with an impregnated drilling tool.

Methods: computer modeling, analytical research, analysis.

Result. Changing the design of the end face of the diamond tool matrix in the direction of shifting the uniformity of the placement of sectors leads to an uneven distribution of drilling mud in the area of operation of the tool. As a result, the most sludge bound sectors are less well cleaned with drilling mud and wear out faster. To implement the task – the eccentricity of the cutting part with a high resource, the variants of the design of the end face of the impregnated crown are proposed.

Key words:

Diamond drilling tools, eccentricity of the cutting part of the end face of the diamond drilling tool matrix, hydrodynamics during drilling, circulation system of the drilling tool, computer modeling.

REFERENCES

1. Neskoromnykh V.V. *Napravlennoe burenie i osnovy kernometrii* [Directional drilling and core measurement]. Moscow, INFRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2015. 327 p.
2. Neskoromnykh V.V., Petenev P.G., Neverov A.L., Pushmin P.S., Romanov G.R. Development and experimental studies of the features of the diamond core for drilling in solid anisotropic rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 326, no. 4, pp. 30–40. In Rus.
3. Tretyak A.A., Shvec V.V. The new type of strainer construction. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*. Ed. by V.S. Litvinenko. London, Taylor & Francis Group, 2020. Vol. 2, pp. 925–929.
4. Larin A.A. *Issledovanie protsessa vzaimodeystviya almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta s anizotropnoy gornoy porodoy s tselyu vyyavleniya zakonomernostey estestvennogo iskrivleniya skvazhin*. Dis. Kan. nauk [Investigation of interaction of diamond rock cutting tools with anisotropic rock in order to identify patterns of natural curvature of wells. Cand. Diss.]. Tomsk, 2000. 192 p.
5. Neskoromnykh V.V. *Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh gornykh porodakh* [Well curvature in anisotropic rocks]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2017. 199 p.
6. Pushmin P.S. *Obosnovanie modeli almaznoy koronki na osnove issledovaniya mekhaniki razrusheniya tverdykh anizotropnykh porod*. Dis. Kand. nauk [Justification of a diamond crown model

- based on a study of the mechanics of fracture of solid anisotropic rocks. Cand. Diss. J. Irkutsk, 2006. 131 p.
7. 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.
 8. Ding L., Wang Z., Liu B., Lv J. Borehole stability analysis: a new model considering the effects of anisotropic permeability in bedding formation based on poroelastic theory. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, vol. 69, pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102932> (accessed 3 March 2020).
 9. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, vol. 37 (13), pp. 1913–1929.
 10. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
 11. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
 12. Bobet A. Lined circular tunnels in elastic transversely anisotropic rock at depth. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, vol. 44, no. 2, pp. 149–167.
 13. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
 14. Aliev A.A., Ismagilova Z.F., Ulshina K.F. Determination of the strength characteristics of anisotropic rocks during shear according to the results of triaxial compression. *Oilfield Engineering*, 2016, no. 9, pp. 25–28. In Rus. Available at: <https://rucont.ru/efd/472642> (accessed 28 February 2020).
 15. Krivosheev V.V. *Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh porodakh* [Well curvature in anisotropic rocks]. Tomsk, NTL Publ., 1999. 240 p.
 16. Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii* [Materials of the regional conference of geologists of Siberia, the Far East and North-East of Russia]. Tomsk, 2000. Vol. I, pp. 463–465.
 17. Ma T., Zhang Q.B., Chen P., Yang C., Zhao J. Fracture pressure model for inclined wells in layered formations with anisotropic rock strengths. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 149, pp. 393–408.
 18. Houali A., Tiab D. Analysis of interference testing of horizontal wells in an anisotropic medium. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, APOGCE SPE 88537*. Perth, Australia, 2004. pp. 725–734.
 19. Wenning Q.C., Almqvist B.S.G., Hedin P., Zappone A. Seismic anisotropy in mid to lower orogenic crust: Insights from laboratory measurements of V_p and V_s in drill core from central Scandinavian Caledonides. *Tectonophysics*, 2016, vol. 692, pp. 14–28.
 20. Atlas Copco company. Drilling equipment for the production of geological exploration and engineering survey works. Catalog. 2016. Available at: <http://www.atlascopco.us/usus/products/drilling-tools/1527859/> (accessed 3 March 2020).
 21. Boart Longear. *Catalog of diamond products*. 2015. Available at: <http://www.boartlongear.com/drilling-equipment/catalog/> (accessed 3 March 2020).
 22. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
 23. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
 24. Sterenlicht D.V. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 640 p.
 25. Nikolaev A.O., Neverov A.L., Mineev A.V., Gusev A.V. *Burovye promyvochnye zhidkosti. Burovye rastvory na vodnoy osnove* [Drilling fluids. Water-based drilling fluids]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2012. 156 p.
 26. Popova M.S., Ostapyuk A.Yu. Techenie zhidkosti na zaboe skvazhiny pri burenii almaznoy odnosloynoy koronkoy [The fluid flow at the bottom of the well when drilling with a diamond single-layer crown]. *Problemy nedropolzovaniya: Sbornik nauchnykh trudov* [Problems of subsoil use: collection of scientific papers]. St. Petersburg, Mining University Publ., 2018. P. I, pp. 87–89.
 27. Neskoromnykh V.V., Petenev P.G., Jordan V.I. *Almaznaya koronka dlya bureniya* [Diamond core for drilling]. Patent RF, no. 171734, 2017.
 28. Neskoromnykh V.V., Neverov A.L., Petenev P.G. *Almaznaya koronka dlya bureniya* [Diamond core for drilling]. Patent RF, no. 161061, 2016.

Received: 22 October 2020.

Information about the authors

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

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

Marina S. Popova, Cand. Sc., senior teacher, Siberian Federal University.

Igor A. Komarovskiy, senior laboratory assistant, Siberian Federal University.

Anton E. Golovchenko, assistant, Siberian Federal University.

Liu Baochang, professor, Jilin University.

УДК 338.2:55398

ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ВЫБОРА ПОДРЯДЧИКА КРУПНЫХ КАПИТАЛЬНЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРОЕКТОВ

Давыденков Евгений Владимирович,
evdavydenkov@gmail.com

ООО «Газпромнефть-НТЦ»,
Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75–79, лит. Д.

Актуальность работы заключается в изменении принципов и подходов определения партнеров для реализации крупных капитальных нефтегазовых проектов.

Целью работы является обоснование трансформации принципов взаимоотношений нефтегазовых компаний с подрядчиками нефтегазовых проектов для совместного решения стратегических бизнес-задач.

Методы исследования заключаются в оптимизации проектных решений на основе логических построений концепции продуктовой модели деятельности нефтегазовых компаний.

Результаты. Наиболее оптимальным способом выбора взаимоотношений с подрядчиками и поставщиками может быть стратегия контрактования. А для крупного капитального проекта – интегрированная стратегия контрактования. Она представляет собой документ, содержащий интегрированный план реализации проекта, карту контрактов с необходимым количеством подрядчиков и поставщиков и подходы к их выбору, проработанный в том числе с учетом возможных синергий по контрактам и, возможно, проектам. В определении стратегии выбора подрядчиков и поставщиков необходимо учитывать: их текущий опыт взаимодействия с компанией и с другими заказчиками, их текущую загрузку обязательствами перед компанией, текущие мощности подрядчика или поставщика, его возможности по наращиванию таких мощностей, способность подрядчиков осваивать и управлять финансовыми потоками, опыт выполнения работ будущими подрядчиками в схожих условиях.

Выводы. Необходимо создание контрактной стратегии и моделей взаимоотношений с подрядчиками крупных капитальных нефтегазовых проектов начиная с ранних стадий, преемственности при переходе от стадии к стадии реализации проекта, проработки условий взаимодействия и последующего управления договорами. Все эти аспекты должны быть учтены в соответствующей интегрированной стратегии контрактования, которая станет сводным документом по управлению взаимоотношениями с подрядчиками, а также инструментом по контролю и управлению потребностью проекта. Максимальная гибкость проекта в отношениях с подрядчиками будет обеспечиваться через соответствующие механизмы – открытые договоры, условия ценообразования и мотивации подрядчиков. Новая система определения партнеров для реализации крупных капитальных нефтегазовых проектов успешно адаптирована в ПАО «Газпром нефть».

Ключевые слова:

Крупный нефтегазовый проект, управление проектом, стратегия снабжения, рамочный договор, выбор подрядчиков.

Введение

В настоящее время нефтяная отрасль страны переживает эпоху реализации сложных инфраструктурных проектов. Это связано с ростом инвестиционных возможностей, а также с необходимостью компенсировать падение добычи нефти на зрелых месторождениях. При этом нефтяные компании сегодня работают как в своих традиционных регионах, так выходят в новые – месторождения на суше и на море. По прогнозам в ближайшие годы нефтяные компании страны будут добывать около 20 % объема нефти в новых регионах с неразвитой инфраструктурой. Это потребует значительных инвестиций в их освоение – по некоторым прогнозам более 200 млрд долл. в течение 10 лет [1, 2].

Современное состояние нефтегазового проектирования

Существующий опыт и подходы, применяемые при реализации крупных инфраструктурных проектов, позволяют их реализовывать, но при этом нефтяники продолжают сталкиваться с существенными трудностями. Практически все нефтяные компании сегодня применяют проектный метод реализации крупных капитальных проектов, однако в разных объемах проблемы его применения наблюдаются во всех проектах [3–7].

Одной из ключевых проблем остаются *сроки реализации проекта*. По оценкам экспертов срок реализации крупного капитального проекта западными нефтяными компаниями короче на 3–5 лет, чем аналогичный в России. И этому есть много причин. Одна из них – недостаточность и квалификация сотрудников проектных команд в компаниях. Другая – длительность проработки предпроектных стадий и низкое качество результата, что в последствии не позволяет управлять сроками и затратами проекта [7–11].

Второй ключевой проблемой является *непрогнозируемость бюджета реализации проектов*. Практически каждый проект, реализованный в России, завершается с превышением бюджета от первоначального на 20–30 %, а некоторые и более [8, 11]. И тому тоже есть несколько причин.

Одна из них – отсутствие опыта и достаточных возможностей для проработки всех возможных альтернатив реализации проекта, как с технической точки зрения, так и с точки зрения опыта уже реализованных проектов. Работы, проводимые на начальных стадиях проекта по его проектированию и планированию, ведутся либо силами служб компаний-заказчиков, а у них нет достаточного опыта и проработок, чтобы выбрать самый оптимальный и эффек-

тивный способ его реализации, либо привлеченными подрядчиками, а именно, в подавляющем большинстве случаев, проектными институтами, которые в нашей стране давно не занимаются инжиниринговыми проработками проектов и объектов, а проектируют «потоковые» объекты (реконструкция или расширение существующей инфраструктуры), где от персонала проектного института не требуется применение инновационных, наиболее эффективных инженерных решений [8, 11]. Все это приводит к тому, что, когда проект выходит в стадию «реализации», принятые ранее решения пересматриваются, дорабатываются, что ведет к росту бюджета и движению сроков по проекту. Особенно это проявляется именно в новых для нефтяной компании регионах, где не изучены вопросы геологии, логистики, ресурсов и т. п.

Другая причина в самих подрядчиках и поставщиках, которые привлекаются для реализации проекта. Не секрет, что многие нефтяные компании привыкли выбирать подрядчика или поставщика проводя конкурентные процедуры, по результатам которых наиболее вероятным победителем станет подрядчик, предложивший минимальную стоимость реализации проекта. И тут начинается самое интересное: заказчик рассчитывает на то, что подрядчик в должной мере изучил все риски реализации проекта и «понимает» куда идет, а подрядчик, выиграв такой контракт, начинает понимать все нюансы и возможные трудности с его реализации по ходу его выполнения. И тут есть много вопросов: это и качество проработки технического задания самим заказчиком, и время на подготовку предложения подрядчиком, и полнота данных о проекте и площадке, но и со стороны подрядчика отсутствие опыта и наработанной базы реализации таких проектов в схожих регионах, для грамотной и полной оценки рисков и стоимости, это и неумение управлять такими масштабными проектами, что видно по самим структурам таких подрядчиков, в которых отсутствуют выделенные ресурсы по проектному планированию, оценки эффективности, инженерные мощности и т. п. Все это ведет к тому, что в процессе реализации проектов и заказчик и подрядчик учатся на конкретном проекте, что приводит к соответствующему снижению эффективности [11].

Помимо этого, существует противоречие между мотивациями проектных организаций, привлекаемых для реализации проектов, и подрядчиками/поставщиками, которые также существенным образом влияют на последующий процесс строительства объекта и реализации проекта в целом. Ключевое противоречие в том, что движет проектными институтами при проектировании объекта. Зачастую это минимизация своих расходов на проработку решений, т. к. после победы в конкурсе на проектирование в конкурентной борьбе, стоимость работ снижается так, что возможности для детальной проработки проекта не остается, а остается только взять с «полки» уже имеющийся проект, поменять штамп и направить проект на экспертизу заказчику, а заказчик также не всегда задумывается над качеством именно инженерной проработки, а сосредотачивается на получении

положительного заключения Главгосэкспертизы, чтобы потом получить разрешение на строительство и приступить к работам. Подрядчик, или же поставщик, являясь потребителем разработанного проекта и последующей рабочей документации, приступив к выполнению работ, находится перед выбором: либо сделать все по чертежу и получить неоптимальную, а может и нерабочую схему, и вступить с заказчиком в долгие судебные разбирательства, либо сделать все, как надо, что повлечет необходимость самостоятельной переделки проекта, предложения его заказчику, а у заказчика согласования с автором и так далее, вплоть до повторного прохождения экспертизы. В итоге вместо того, чтобы получить оптимальный с экономической и технической точки зрения объект, все стороны вынуждены искать компромисс между собственной репутацией, бюджетом проекта и сроками его реализации.

Разработка решений по выбору подрядчиков нефтегазовых проектов

Одним из способов повышения интегрированности решений, принимаемых в проекте, их увязка с возможностями подрядчиков, проработка наиболее оптимальных подходов к их контрактации, может быть интегрированная стратегия контрактации для крупного капитального проекта. Сегодня во многих компаниях уже применяются такие инструменты взаимодействия с рынком, как стратегия контрактации, однако при реализации крупного капитального проекта с таким подходом есть несколько ограничений: одно из них в том, что стратегии разрабатываются для отдельных видов материалов и оборудования или услуг и по мере развития проекта при возникновении соответствующих потребностей, однако такой подход не позволяет увидеть всю полноту потребности по проекту, определить наиболее эффективный и своевременный способ ее размещения на рынке подрядчиков и поставщиков. Это приводит к множеству циклов выбора подрядчиков, постоянному изменению потребности, что, в свою очередь, ведет либо к новой процедуре выбора подрядчиков, либо к изменению ранее заключенных контрактов. По отдельным проектам объем таких изменений может достигать 40 % от всей потребности по проекту. Все это ложится в снижение эффективности проекта и смещение сроков.

Интегрированная стратегия представляет собой документ, содержащий интегрированный план реализации проекта, карту контрактов с необходимым количеством подрядчиков и поставщиков, подходам к их выбору, проработанный в том числе с учетом возможных синергии по контрактам и, возможно, проектах (если речь идет о группе реализации группы проектов). Такой документ является настольной книгой для руководителя проекта и должен быть постоянно актуален.

Интегрированная стратегия должна быть разработана уже на этапе «выбор» и в последующем поддерживаться и актуализироваться. При ее разработке необходимо учитывать такие вопросы, как:

- частота возникновения потребности в том или ином материале, оборудовании или услуге; это

- будет влиять на сроки контрактов с подрядчиками и поставщиками, а также на возможности их изменения или уточнения по мере развития проекта;
- объем потребности; это влияет на количество необходимых подрядчиков или поставщиков; возможности рынка подрядчиков или поставщиков, т. е. их способности выполнить поручаемый заказ;
 - вопросы логистики в увязке со всеми грузопотоками по проекту, включая грузооборот заказчика и объем грузов, который заказчик планирует передать подрядчикам, т. к. это может напрямую влиять на необходимость к созданию инфраструктуру;

- другие вопросы, которые необходимо учесть службе снабжения крупного капитального проекта.

При этом ключевой компетенцией для службы снабжения при реализации крупного капитального проекта будет скорость реакции на запрос в соответствующем ресурсе. Для этого необходимо разрабатывать и использовать гибкие инструменты взаимодействия с подрядчиками и поставщиками, позволяющие быстро реагировать на заказы и управлять изменениями в объеме и сроках реализации проектов. Целесообразно применять такой инструмент, как карта контрактов, который позволяет управлять потребностью и распределять ее по соответствующим договорным обязательствам (рис. 1).

Вид услуг или материально-технические ресурсы Type of service or material and technical resources	Объект реализации в составе проекта Object of implementation as part of the project			
Проектирование Design	Подрядчик 1 Contractor 1	Подрядчик 5 Contractor 5	Подрядчик 6 Contractor 6	
Строительно-монтажные работы Construction	Подрядчик 2 Contractor 2		Подрядчик 2 Contractor 2	Подрядчик 8 Contractor 8
Пусконаладочные работы Commissioning	Подрядчик 3 Contractor 3		Подрядчик 7/Contractor 7	
Поставка оборудования Equipment supply	Поставщик 1 Supplier 1		Поставщик 3 Supplier 3	
Поставка материалов Supply of materials	Поставщик 2 Supplier 2	Подрядчик 5 Contractor 5	Поставщик 4 Supplier 4	Поставщик 2 Supplier 2
Строительный контроль заказчика Technical supervision	Подрядчик 4/Contractor 4			

Рис. 1. Карта контрактов нефтегазового проекта

Fig. 1. Map of oil and gas project contracts

Кроме того, в определении стратегии выбора подрядчиков и поставщиков необходимо учитывать, что выбор ключевых подрядчиков, выполнение работ которых лежит на критическом пути проекта, необходимо осуществлять по совокупности знаний о подрядчике или поставщике. Например:

1. Учитывать его текущий опыт взаимодействия с компанией либо изучить опыт взаимодействия с другими заказчиками. Хорошим примером такого изучения могут стать референс-визиты на объекты, на которых подрядчик выполняет работы в настоящий момент.
2. Учитывать его текущую загрузку обязательствами перед компанией или другими заказчиками, так как это может стать ключевой проблемой для вашего проекта, если требования по обязательствам от других заказчиков будут усиливаться.
3. Учитывать не только текущие мощности подрядчика или поставщика, но и его возможности по наращиванию таких мощностей, так как срок реализации проектов длительный и в этот период у подрядчика или поставщика могут возникнуть новые обязательства.
4. Учитывать его способность осваивать и управлять финансовыми потоками в размере не менее среднего освоения по объекту/проекту в течение года.

Зачастую для подрядчиков это является невыполнимой задачей, с которой они не справляются, и появляются кассовые разрывы и задолженности по оплатам, с которыми в последствии приходится справляться самому заказчику.

5. В случае если проект находится на труднодоступной территории, с отсутствием круглогодичного проезда, или в условиях экстремальных температур, опыт выполнения работ будущим подрядчиком в схожих условиях должен стать обязательным критерием выбора. Умение подготовить организацию к условиям работы в автономии или низких температур, обеспечить необходимый завоз и накопление топлива, материалов, питания, одежды и пр. – отдельная компетенция в менеджменте подрядчика. Если этого не учесть, то существует риск для заказчика в первый же сезон проводить операцию по спасению подрядчика, и не все подрядчики это переживают, а для проекта это смещение сроков, увеличение стоимости реализации и пр.

Это только ключевые критерии, на которые стоит обратить внимание при выборе подрядчика, а есть еще множество других, таких как: соответствие стандартам качества, наличие в структуре подрядчика необходимых для выполнения работ служб, соблюде-

ние требований промбезопасности, применение которых должно быть детально проработано до принятия решения о выборе того или иного подрядчика для реализации проекта. Но с выбором качественного подрядчика все только начинается. Необходимо иметь соответствующий опыт взаимодействия с сильным подрядчиком и самому заказчику и уметь видеть в подрядчике своего партнера, который поможет реализовать проект, – это грамотная и дальновидная стратегия заказчика.

Для формирования основы таких отношений лучшей практикой считается заключение долгосрочного договора на реализацию проекта. Суть такого договора не в заключении его только на конкретный объект/стройку, а в возможности гибкого управления мощностями своего подрядчика/поставщика, когда условиями договора предусматривается возможность перемещения подрядчика на другой объект строительства без проведения дополнительных процедур выбора. Схема работы такого договора приведена на рис. 2.

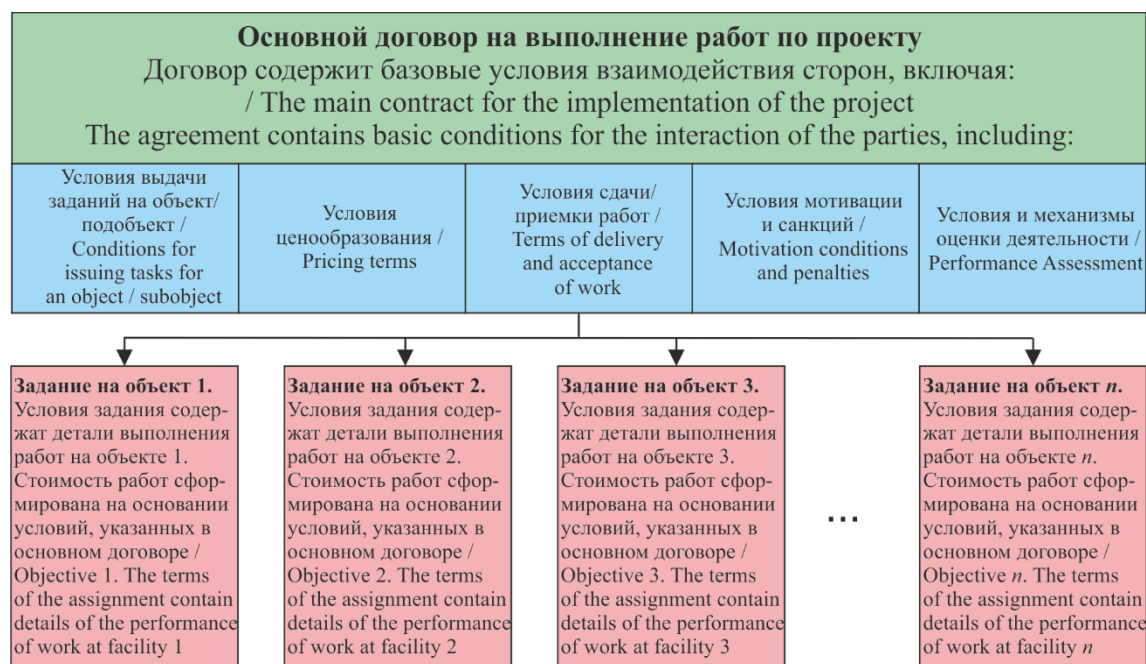


Рис. 2. Схема долгосрочного договора подряда нефтегазового проекта

Pic. 2. Scheme of a long-term oil and gas project contract

Однако, если для реализации проекта необходимо привлечь несколько подрядчиков/поставщиков, и каждый из них будет работать по аналогичной договорной схеме, у системы снабжения должны появиться инструменты управления такими договорами, например оценка деятельности подрядчика, управление долями рынка каждого подрядчика. Оценку деятельности целесообразно вводить при работе с длительными договорами, чтобы иметь возможность управлять качеством работ подрядчика/поставщика. Такая система отдельно прорабатывается и включается в условия соответствующих договоров. Не секрет, что если подрядчик/поставщик получит долгосрочный контракт на выполнение комплекса работ или большего объема поставки, в течение более полутора лет, это может явиться условием некоего успокоения подрядчика и через некоторое время качество его работ или материалов и оборудования начнет снижаться. Чтобы избежать этого и иметь возможность стимулировать деятельность подрядчика, вводятся соответствующие ключевые показатели эффективности, складывающиеся в систему оценки деятельности. Такими показателями могут быть:

- соответствие персонала и оборудования, имеющегося на объекте, условиям выполнения работ;

- показатели качества выполнения работ: процент брака, переделок; отступление от норм и правил, а также проектно-сметной документации по объекту;
- количественные показатели предписаний строительного контроля на объекте строительства (остановка работ, нарушение технологии и пр.);
- соблюдение сроков, предусмотренных договором;
- соблюдение норм и правил промышленной безопасности;
- соблюдение условий проживания работников подрядчика и т. д.

Для поставщиков это могут быть показатели брака, соблюдение сроков, скорости реагирования на запросы заказчика и т. д.

Введение механизма оценки деятельности позволяет своевременно реагировать на ухудшение ситуации у подрядчика (например, отрицательная динамика брака) и принимать оперативные меры, когда ситуацию еще можно исправить. Кроме того, такой механизм позволяет службе снабжения проекта управлять долями рынка подрядчиков. Приведем пример, в результате проведенного выбора подрядчиков для проекта у вас оказалось четыре подрядчика, имеющих на руках долгосрочные открытые договоры, каждый из них работает на конкретном участке работ, однако в

определенный момент возникает потребность начать работы на новом объекте или нескольких объектах. Как распределить новый объем среди имеющихся подрядчиков? Отдать первому? Отдать всем по частям? Если отдать все одному, то остальные подрядчики не почувствуют заинтересованность в продолжении сотрудничества с вами и после завершения уже имеющих обязательств уйдут с проекта. Для вас это риски выбора новых подрядчиков, процесс привлечения подрядчика к заказчику, риск смещения сроков и т. д. Для того чтобы иметь объективный инструмент управления дополнительными объемами, вводится система управления долями рынка. Такая система позволяет завязать возможность подрядчика, его текущую загрузку и оценку деятельности с процессом принятия решения о распределении новых объемов работ. Как правило, условия распределения включаются в договор и являются прозрачными для подрядчика. В любой момент времени подрядчик понимает взаимосвязь своей текущей результативности с возможностью получения дополнительных объемов работ. В таком случае новый объем работ из нашего примера будет распределен подрядчику, имеющему лучшие показатели оценки деятельности и необходимые мощности для выполнения такого объема. Это позволяет равномерно загружать всех имеющихся у вас подрядчиков, минимизируя и распределяя риски.

Все эти условия и механизмы должны быть учтены в интегрированной стратегии для того, чтобы иметь возможность управлять всеми договорами, имеющимися на проекте. Отдельного рассмотрения заслуживает введение механизмов мотивации подрядчиков/поставщиков за ускорение, результат, оптимизацию стоимости или проектных решений. Такой мотивацией могут быть премии, дополнительные объемы, разделение прибыли и пр. Введение механизмов мотивации создает дополнительную ценность для проекта, которую может принести подрядчик/поставщик. Например, заказчик может предусмотреть в договоре возможность премии подрядчику за ускорение работ на объекте. Как правило, такая премия устанавливается для объектов, которые являются ключевыми для проекта и в результате ввода в эксплуатацию которых заказчик начинает извлекать прибыль. В таких случаях на этапе проработки договорных условий проект формирует требование о возможности ввода соответствующего объекта ранее срока, установленного договором. Например, срок ввода объекта в соответствии с проектным графиком – декабрь, при этом заказчик понимает, что если в результате оптимизационных мероприятий со стороны подрядчика и команды проекта ввод объекта удастся перенести на месяц, то проект раньше срока начнет генерировать прибыли, а значит и возвращать инвестиции, затраченные на его создание. В таких случаях условиями договора с подрядчиками предусматривается премия в адрес подрядчика в случае, если ввести объект удастся раньше директивного срока. Такая премия устанавливается в процентах от стоимости договора и, как правило, полностью или частично выплачивается персоналу подрядчика. Про-

цент премирования может быть привязан к сроку, на который удалось сократить ввод. Например, за ввод на месяц ранее – 0,5 % от стоимости договора, за ввод на два месяца ранее – 1 % от стоимости договора. Конечно, такие условия не могут служить оправданием некачественного выполнения работ подрядчиком. Условия качества и безопасности сохраняются в любом случае. Более того, при условии наличия у проекта системы оценки деятельности подрядчика, которая учитывает, в том числе, показатели качества работ, регулярные низкие показатели могут являться основанием для невыплаты соответствующей премии.

Аналоги такой стратегии уже применяются при реализации крупных проектов зарубежными нефтяными компаниями (Эксон Мобил, Шелл, Тотал, Ени, Петрочайна и др.) [12–20], в нашей стране пока опыт их применения незначителен [11].

ПАО «Газпром нефть» сегодня занимается активным внедрением таких инструментов управления потребностью и взаимодействия с рынком подрядчиков. Практически все новые проекты компании сегодня реализуются с применением части или полного набора таких инструментов. Ранее, по результатам реализации своих крупных проектов, таких как Новый Порт, Мессояха, ПАО «Газпром нефть» были сформированы извлеченные уроки, анализ которых показал, что от начала этапа «Оценка» до завершения этапа «Реализация» срок реализации занимает 12 лет. Этап «Поиск» добавляет к этому сроку еще около трех лет. Итого – около 15 лет до начала промышленной добычи нефти. Однако пример международных лидеров отрасли показывает, что сроки реализации проектов могут быть намного меньше. Исследования, которые проводит консалтинговая компания IPA, свидетельствуют, что ведущие нефтегазовые компании мира сегодня реализуют крупные проекты в сфере добычи уже менее чем за 5 лет. Для ускорения реализации и запуска крупных капитальных проектов ПАО «Газпром нефть» инициировала и реализовала внутренний организационный проект, получивший название Smart Fast Track (SFT) [21]. Smart Fast Track можно перевести как «умное ускорение». Идея не в том, чтобы добиться сокращения проектного цикла любой ценой. Важно, чтобы гонка за сроками не приводила к снижению качества работы – ухудшению показателей по добыче или затратам и в итоге потере ценности проекта. Одними из ключевых изменений были изменения в подходах работы с подрядными организациями и поставщиками. Все изменения направлены на сокращения сроков – раннее или долгосрочное контрактование. Поиск подрядчиков на самые разные виды услуг, начиная с сейсморазведки и заканчивая строительно-монтажными работами, а также поставщиков оборудования должен начинаться заранее, еще до получения конечных технических условий. Конкурсы при этом проводятся по предварительным данным или объектам-аналогам, контракты первоначально включают лишь условия ценообразования на каждый вид работ – так, чтобы в будущем, когда появятся конкретные технические параметры или объемы работ, можно было легко рассчитать

окончательную стоимость контракта. Такой подход позволяет на 8 месяцев сократить сроки реализации крупных проектов и убрать проблемы контрактования с критического пути проекта. Все новые крупные проекты ПАО «Газпром нефть» реализуются с применением выработанных подходов, например, проекты по освоению Тазовского и Северо-Самбургского месторождений. Применение выработанных подходов позволило на ранних стадиях разработки месторождений провести конкурсы и определить ключевых подрядчиков и поставщиков, с которыми сомневаться в успехе реализации данных проектов не приходится.

В результате трансформации подходов можно выделить следующие ключевые направления взаимоотношений ПАО «Газпром нефть» с подрядчиками:

1. Безопасность работ – безопасность персонала и окружающей среды, обеспечение которых превышает соображений экономического и технического характера.
2. Взаимоуважение и доверие. Сокращение формальностей и бюрократических барьеров при подрядных работах. Смещение вектора взаимоотношений с подрядчиками с надзора и контроля к взаимному доверию и взаимной ответственности друг перед другом. Независимость договоров от конкретных персоналий. Приоритет корректирующих мероприятий перед практикой штрафных санкций.
3. Максимальная информационная открытость компании, которая строится на принципах надежности и честности ведения дел. Прозрачный механизм изменений договоров подряда и решения возникающих споров.
4. Поощрение новаторства и инноваций среди подрядчиков в процессе взаимодействия с компанией. Помощь в адаптации подрядчиков, начинающих выполнение работ на объектах компании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инвестиционная деятельность нефтегазовых компаний России / И.В. Филимонова, И.В. Проворная, А.В. Комарова, С.И. Шумилова // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2019. – № 5 (173). – С. 13–20.
2. Филимонова И.В., Эдер Л.В., Комарова А.В. Структура и динамика инвестиционных затрат в нефтегазовой отрасли России // Экологический вестник России. – 2019. – № 11. – С. 4–10.
3. Зотов Ф.П. Организация проектов изменений в стратегическом управлении на российском предприятии нефтегазовой промышленности // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2011. – № 11. – С. 4–7.
4. Синельников А.А. Методические основы формирования портфеля инновационных проектов // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2014. – № 2. – С. 4–8.
5. Герасимова М.В., Ямилова Я.В. Методические аспекты формирования системы стратегического управления рисками нефтегазовых проектов // Евразийский юридический журнал. – 2017. – № 5 (108). – С. 331–335.
6. Фадеев А.М., Череповицын А.Е., Ларичкин Ф.Д. Стратегическое управление нефтегазовым комплексом в Арктике. – Апатиты: Апатиты, 2019. – 289 с.
7. Молчанов К.К. Алгоритм управления портфелем проектов в национальных нефтегазовых компаниях // Актуальные исследования. – 2020. – № 6 (9). – С. 55–57.
8. Авдеева Л.А., Мусабирова К.М. Совершенствование процессов планирования и управления стоимостью проектов в про-

Заключение

Для успешной реализации проекта на ранних стадиях требуется проработка контрактных моделей и условий взаимодействия с подрядчиками. Проработка подходов должна иметь преемственность при переходе от стадии к стадии реализации проекта, а также необходимо достаточно времени для проработки всех инструментов. Кроме того, целесообразно все условия взаимодействия, условия тендерных процедур, а также последующего управления договорами предварительно прорабатывать с рынком подрядчиков/поставщиков. Это позволит вести открытый диалог с потенциальными подрядчиками по условиям дальнейшей работы, а также учесть и проработать все условия, которые не будут рабочими по различным причинам в дальнейшем. К таким причинам можно отнести и неготовность подрядчиков/поставщиков на некоторые предлагаемые вами условия. И это необходимо учитывать, так как на этапе выбора подрядчика/поставщика все несогласия или непонятные для подрядчика/поставщика условия выливаются в соответствующее увеличение расценок по договору.

Все эти аспекты должны быть учтены в соответствующей интегрированной стратегии заключения контрактов, которая станет сводным документом по управлению взаимоотношениями с подрядчиками, а также инструментом по контролю и управлению потребностью проекта. Кроме того, стратегия должна обеспечивать максимальную гибкость для проекта в отношениях с подрядчиками через соответствующие механизмы (открытые договоры, условия ценообразования и мотивации подрядчиков).

Новая система принципов и подходов определения партнеров для реализации крупных капитальных нефтегазовых проектов проходит успешную адаптацию в ПАО «Газпром нефть».

- ектных организациях // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14. – № 2. – С. 125–132.
9. Бородин С.С., Зубарева В.Д., Саркисов А.С. Процедура формирования и реструктурирования портфеля проектов нефтегазовой компании // Нефть, газ и бизнес. – 2017. – № 4. – С. 54–63.
10. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Применение инновационных решений при проектировании объектов нефтегазодобычи // Территория Нефтегаз. – 2017. – № 4. – С. 78–84.
11. Орлов С. Принцип партнерства. «Газпром нефть» меняет модель взаимоотношений с подрядчиками // Сибирская нефть. – 2019. – № 10 (167). – С. 40–44.
12. Fadyeyeva I., Horal L. Application of modern modeling in system of strategic management at oil and gas companies // Economic Annals – XXI. – 2014. – V. 1–2. – № 1. – P. 106–109.
13. Singh G., Tripathi A., Srivastava A. Integrated supply chain outsourcing – expanding the role of third party logistics in the upstream industry // Society of Petroleum Engineers Oil and Gas: Conference and Exhibition 2015; – Mumbai; India, 2015. – Code 117754.
14. Katterbauer K. A decision support framework for the technical and economical optimisation of the supply chain and project scheduling for oil and gas projects under uncertainty – A case study approach // Offshore Technology Conference Asia 2016. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2016. – Code 138191. – P. 959–972.
15. Elhaddad A. Risk based quality control in projects procurement // Society of Petroleum Engineers – SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2017. – Abu Dhabi, 2017. – Code 133061.

16. Redutskiy Y. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry // *Procedia Computer Science*. – 2017. – V. 109. – P. 745–753.
17. Robinson P.R., Hsu C.S. Introduction to petroleum technology // *Springer Handbooks*. – 2017. – P. F1. – P. 1–83. DOI: 10.1007/978-3-319-49347-3_1
18. Al Mhdawi M.K. Proposed risk management decision support methodology for oil and gas construction projects // *Lecture Notes in Mechanical Engineering – 10th International Conference on Engineering, Project, and Production Management, EPPM 2019*. – Berlin, 2020. – Code 238279. – P. 407–420.
19. Sustainable supply chain management strategy influence on supply chain management functions in the oil and gas distribution industry / M.S. Florescu, E.G. Ceptureanu, A.F. Cruceru, S.I. Ceptureanu // *Energies*. – 2019. – V. 12. – № 9. – Article number 1632. DOI <https://doi.org/10.3390/en12091632>.
20. Nodeh M.J., Calp M.H., Şahin İ. A novel hybrid model for vendor selection in a supply chain by using artificial intelligence techniques case study: petroleum companies // *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. – 2020. – V. 43. – P. 226–251. DOI: 10.1007/978-3-030-36178-5_19.
21. Алексеев А. Умное ускорение. «Газпром нефть» в два раза увеличит скорость реализации крупных проектов // *Сибирская нефть*. – 2017. – № 6 (143). – С. 22–27.

Поступила 22.10.2020 г.

Информация об авторах

Давыденков Е.В., заместитель генерального директора ООО «Газпромнефть-НТЦ».

UDK 338.2:55398

OPTIMAL STRATEGY FOR SELECTING A CONTRACTOR FOR MAJOR CAPITAL OIL AND GAS PROJECTS

Evgeny V. Davydenkov,
evdavydenkov@gmail.com

Gazpromneft-STC LLC,
75–79, lit. D, Moika river embankment, Saint Petersburg, 190000, Russia.

The relevance of this work is in changing the principals and approaches to selection of partners for implementation of large-scale infrastructure oil and gas projects.

The aim of this work is to prove the necessity of transforming the principals of relationship of oil and gas companies with the contractors in large oil and gas projects for joint solving the strategic business cases.

The method of the study is in optimization of the project decisions based on logical constructions of conception of the products' model of oil and gas companies activities.

Results. The most optimal tool for choosing the type of relationship with contractors and suppliers may be a contracting strategy, for a large infrastructure project – an integrated contracting strategy. This is a document that includes a comprehensive plan for implementation of the project, a map of all contracts with the necessary contractors and suppliers, a description of the approach to their selection, taking into account all possible synergies in the framework of contracts and, possibly, in the framework of projects. When determining the selection strategy for contractors and suppliers, it is necessary to take into account their current experience of cooperation with your company and other customers, their current burden on obligations to your company, the current capacity of the supplier or contractor and the ability to increase its capacity, the ability to consume and manage financial flows, experience in similar conditions.

Resume. When implementing a large-scale oil and gas infrastructure project, it is extremely important to develop a strategy for concluding contracts and models of relationships with contractors and suppliers at the earliest stages of the project, continuity in the transition from stage to stage of project implementation, development of conditions for interaction and subsequent management of contracts. All these aspects should be taken into account in a comprehensive contracting strategy, which should be a consolidated document for contractor management relationships, as well as a monitoring and project management tool. The maximum flexibility of the project in a relationship with contractors will be ensured through appropriate mechanisms – open contracts, pricing and motivation conditions for contractors. The new system for identifying partners for implementing major capital oil and gas projects has been successfully adapted in Gazpromneft.

Key words:

Large oil and gas project, project management, supply strategy, framework agreement, selection of contractors.

REFERENCES

- Filimonova I.V., Provornaya I.V., Komarova A.V., Shumilova S.I. Investment activities of Russian oil and gas companies. *Problems of economy and management of the oil and gas complex*, 2019, no. 5 (173), pp. 13–20. In Rus.
- Filimonova I.V., Eder L.V., Komarova A.V. Structure and dynamics of investment costs in the Russian oil and gas industry. *Ecological Bulletin of Russia*, 2019, no. 11, pp. 4–10. In Rus.
- Zotov F.P. Organization of projects for changes in strategic management at a Russian oil and gas company. *Problems of economy and management of the oil and gas complex*, 2011, no. 11, pp. 4–7. In Rus.
- Sinelnikov A.A. Methodological bases of forming a portfolio of innovative projects. *Problems of economy and management of the oil and gas complex*, 2014, no. 2, pp. 4–8. In Rus.
- Gerasimova M.V., Yamilova Ya.V. Methodological aspects of forming a strategic risk management system for oil and gas projects. *Eurasian legal journal*, 2017, no. 5 (108), pp. 331–335. In Rus.
- Fadeev A.M., Cherepovitsyn A.E., Larichkin F.D. *Strategicheskoe upravlenie neftegazovym kompleksom v Arktike* [Strategic management of the oil and gas complex in the Arctic]. Apatity, Apatity Publ., 2019. 289 p.
- Molchanov K.K. Algorithm for project portfolio management in national oil and gas companies. *Current research*, 2020, no. 6 (9), pp. 55–57. In Rus.
- Avdeeva L.A., Musabirova K.M. Improving project cost planning and management processes in project organizations. *Oil and gas business*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 125–132. In Rus.
- Borodin S.S., Zubareva V.D., Sarkisov A.S. Procedure for forming and restructuring the oil and gas company's project portfolio. *Oil, gas and business*, 2017, no. 4, pp. 54–63. In Rus.
- Gasumov R.A., Gasumov E.R. Application of innovative solutions in the design of oil and gas production facilities. *Territory of Neftegaz*, 2017, no. 4, pp. 78–84. In Rus.
- Orlov S. Principle of partnership. «Gazprom oil» changes the model of relations with contractors. *Siberian oil*, 2019, no. 10 (167), pp. 40–44. In Rus.
- Fadyeyeva I., Horal L. Application of modern modeling in system of strategic management at oil and gas companies. *Economic Annals – XXI*, 2014, vol. 1–2, no. 1, pp. 106–109.
- Singh G., Tripathi A., Srivastava A. Integrated supply chain outsourcing – expanding the role of third party logistics in the upstream industry. *Society of Petroleum Engineers Oil and Gas. Conference and Exhibition 2015*. Mumbai, India, 2015. Code 117754.
- Katterbauer K. A decision support framework for the technical and economical optimisation of the supply chain and project scheduling for oil and gas projects under uncertainty – A case study approach. *Offshore Technology Conference Asia 2016*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2016. Code 138191, pp. 959–972.
- Elhadad A. Risk based quality control in projects procurement. *Society of Petroleum Engineers SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2017*. Abu Dhabi, 2017. Code 133061.
- Redutskiy Y. Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 109, pp. 745–753.
- Robinson P.R., Hsu C.S. *Introduction to petroleum technology*. Cham (Switzerland), Springer International Publishing AG, 2017. P. F1, 83 p. DOI: 10.1007/978-3-319-49347-3_1
- Al Mhdawi M.K. Proposed risk management decision support methodology for oil and gas construction projects. *Lecture Notes in Mechanical Engineering – 10th International Conference on Engineering, Project, and Production Management (EPPM 2019)*. Berlin, 2020. Code 238279, pp. 407–420.
- Florescu M.S., Ceptureanu E.G., Cruceru A.F., Ceptureanu S.I. Sustainable supply chain management strategy influence on supply chain management functions in the oil and gas distribution industry. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 9, article number 1632. DOI <https://doi.org/10.3390/en12091632>.

20. Nodeh M.J., Calp M.H., Şahin İ. A novel hybrid model for vendor selection in a supply chain by using artificial intelligence techniques case study: petroleum companies. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2020, vol. 43, pp. 226–251. DOI: 10.1007/978-3-030-36178-5_19.
21. Alekseev A. Smart acceleration. Gazprom Neft will double the speed of implementation of major projects. *Siberian oil*, 2017, no. 6 (143), pp. 22–27. In Rus.

Received: 22 October 2020.

Information about the authors

Evgeny V. Davydenkov, deputy general director, Gazpromneft-STC LLC.

УДК 622.271.3.06:621.926

РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОДСИСТЕМЫ «КАРЬЕРНЫЙ ТРАНСПОРТ – ДРОБИЛЬНЫЙ ПЕРЕДЕЛ» С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРОБИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Журавлев Артем Геннадиевич¹,
juravlev@igduran.ru

Черепанов Владимир Александрович¹,
transport@igduran.ru

¹ Институт горного дела УрО РАН,
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность. В современных условиях, когда необходимо наращивание производственной мощности действующих горно-обогатительных комбинатов, повышение производительности карьера не может рассматриваться в отрыве от возможностей дробильно-обогатительных фабрик. При решении вопросов повышения мощности карьерного транспорта требуется уделять внимание оптимизации его взаимодействия с первичными стадиями обогатительного производства, а для этого необходимо рассматривать его совместно со звеном магистрального транспорта, как единую технологическую систему.

Целью исследования является выявление резервов повышения производительности подсистемы «карьерный транспорт – дробильный передел» с учетом коэффициентов использования дробильного оборудования на основе обобщения опыта его эксплуатации и предъявляемых требований к эксплуатационной надежности, сложившихся в современных условиях.

Объекты: карьерный транспорт и дробильное оборудование.

Методы: хронометраж, обработка статистических данных, систематизация, анализ и обобщение, расчет производительности.

Результаты. Структурированы наиболее распространенные технологические схемы транспорта и дробильного оборудования, применяемые на современных ГОКах. Определены ключевые ограничивающие факторы увеличения производительности для подсистемы горного предприятия «карьерный транспорт – дробильный передел». Произведены расчеты достижимой интенсивности загрузки различным карьерным транспортом для стабильной высокопроизводительной работы дробилок. Определены и рассчитаны показатели надежности работы дробилок. Выявлены основные факторы, влияющие на их эксплуатационную надежность, потребную периодичность и объем ремонтных работ, а также время производительной работы. Проведен анализ опыта эксплуатации дробилок, и сформулированы требования к организации их работы и порядка загрузки для обеспечения высокой производительности. Показано, что в условиях необходимости наращивания производственной мощности действующих ГОКов важным и реализуемым является использование резервов повышения производительности действующего дробильного оборудования: 10–30 % за счет обеспечения равномерной подачи транспорта на разгрузку, 5–10 % за счет оптимизации порядка работы цепи аппаратов дробильно-обогатительной фабрики во времени, 3–5 % за счет совершенствования технического обслуживания и ремонта. При этом повышение коэффициента использования оборудования дробильно-обогатительных фабрик необходимо рассматривать в увязке с работой технологического транспорта. Для стабильной высокопроизводительной работы транспортно-обогатительного передела горного предприятия необходимо одновременно налаживать организацию взаимодействия транспортного и дробильного оборудования и формировать эффективную систему обеспечения работоспособности этого оборудования, в том числе за счет максимального использования технических возможностей.

Ключевые слова:

Карьерный транспорт, дробилка, приемный бункер, коэффициент готовности, эффективность, производительность, дробильное оборудование.

Введение

Технологические комплексы добычи и переработки руды являются взаимосвязанными системами и для рудных горнодобывающих предприятий и, как правило, объединены в горно-обогатительные комбинаты. Связующее звено между ними – технологический транспорт. Дробильно-обогатительные фабрики (ДОФ) размещены на различном расстоянии от карьера (группы карьеров), поэтому часто доставку руды осуществляет магистральное звено карьерного транспорта (железнодорожный, конвейерный, автомобильный).

В современных условиях, когда необходимо наращивание производственной мощности действующих ГОКов, повышение производительности карьера не может рассматриваться в отрыве от возможностей ДОФ. И если разработка карьера как постоянно видоизменя-

ющейся выработки может быть относительно просто форсирована (в т. ч. за счет внедрения более высокопроизводительного оборудования), то для ДОФ рациональным является поиск резервов в рамках существующих производственных сооружений, с учетом массогабаритных характеристик эксплуатирующихся машин.

Среди прочих мероприятий важное значение имеет повышение коэффициента использования оборудования ДОФ, которое необходимо рассматривать в увязке с работой технологического транспорта. Характерным примером является повышение производительности головных дробилок крупного дробления, от которых зависит дальнейшая работа всей цепи аппаратов фабрики. Обеспечение их надежной и безаварийной работы одновременно с максимально возможной равномерностью загрузки позволяет повы-

снять среднегодовую производительность даже без увеличения производительности (форсирования) самого оборудования. В случае наращивания мощности оборудования указанные мероприятия являются обязательными, поскольку в условиях плохо настроенной системы технической эксплуатации потери производительности будут еще больше.

Таким образом, при решении вопросов повышения мощности карьерного транспорта требуется уделять внимание оптимизации его взаимодействия с первичными стадиями обогащения производства. Для этого необходимо рассматривать обогащение производства совместно со звеном магистрального транспорта как единую технологическую систему.

Наиболее распространены следующие технологические схемы транспорта (табл. 1):

- автомобильный сборочно-магистральный (при относительно небольших объемах до 10–15 млн т/год либо высокой динамике продвижения горных работ, делающей затратным постоянный перенос железнодорожных путей и нецелесообразным размещение конвейерного подъемника);
- автомобильно-железнодорожный (самый массовый на крупных ГОКах);
- автомобильно-конвейерный (для карьеров, обрабатываемых по углубочной системе разработки [1]), когда дробленая руда может подаваться непосредственно на стадию среднего и мелкого дробления;
- автомобильно-конвейерно-железнодорожный (формируется при внедрении в существующий автомобильно-железнодорожный транспорт конвейерного звена (циклично-поточной технологии) с переносом железнодорожного звена за пределы карьера) рационален при значительной удаленности ДОФ от карьера.

Практически все описанные схемы транспорта идентичны по параметрам и конструкции приемных устройств дробильного-обогащающих фабрик:

- при относительно невысокой производительности применяются щековые дробилки, загружаемые из приемного бункера питателем;
- при значительных объемах (более 10–15 млн т/год) используются конусные дробилки с непосредственной загрузкой из приемного бункера.

В последнее десятилетие в России получают распространение схемы с автомобильно-автомобильным транспортом, когда магистральные перевозки осуществляются автопоездами. Такой вид транспорта обеспечивает существенное снижение себестоимости перевозок по сравнению с карьерными автосамосвалами и менее требователен в вопросах инфраструктуры в сравнении с железнодорожным транспортом [2–4]. В этом случае приемная способность участка крупного дробления зависит от организации работ по перевалке руды со склада в приемный бункер (погрузчиком при малом расстоянии либо автомобильным транспортом с удаленного склада).

Таким образом, в рассматриваемой постановке задачи производительность карьера и транспорта огра-

ничивается производительностью системы «разгружаемый транспорт – приемный бункер – дробилка крупного дробления – смежное оборудование» либо «подающий конвейер – дробилки среднего и мелкого дробления – смежное оборудование». Рассмотрим пределы возможной оптимизации указанных систем.

Ключевыми ограничивающими факторами для системы являются:

- интенсивность и равномерность подачи транспорта на разгрузку;
- форма и вместимость приемного бункера, количество мест для одновременной разгрузки;
- вместимость транспортных единиц (автосамосвалов, думпкаров);
- часовая производительность дробилки с учетом свойств руд (прочности и абразивности и др.), а также их гранулометрического состава;
- возможность работы дробилки крупного дробления под завалом;
- надежность дробилки, продолжительность простоев в ремонте с учетом свойств руд (прочности и абразивности и др.);
- производительность смежного оборудования (питатели, конвейеры, грохоты);
- надежность и трудоемкость ремонтного обслуживания смежного оборудования.

Методы исследования

Исследование выполнено с использованием данных об эксплуатации щековых дробилок с простым качанием щеки, а также конусных дробилок крупного, среднего и мелкого дробления, производимых ПАО «Уралмашзавод». Для формирования статистической базы данных собрана информация с действующих горнодобывающих предприятий: Ковдорский ГОК (г. Ковдор), Учалинский ГОК (г. Учалы), Северский карьер (г. Екатеринбург, п. Северка), Сибирский карьер (г. Екатеринбург), ОАО «Ураласбест» (г. Асбест), Михайловский ГОК (г. Железногорск), Лебединский ГОК (г. Губкин), Стойленский ГОК (г. Старый Оскол), Гайский ГОК (г. Гай), АО «Апатит» (г. Кировск), Магнитогорский металлургический комбинат (г. Магнитогорск), Качканарский ГОК (г. Качканар), АО «Карельский окатыш» (г. Костомукша), РУПП «Гранит» (г. Микашевичи, Республика Беларусь), Южный ГОК, Центральный ГОК, Ингулецкий ГОК (г. Кривой Рог, Украина).

Выполнялся: хронометраж разгрузочных операций, хронометраж операций по техническому обслуживанию и ремонту, обработка статистических данных о режимах работы и простоях оборудования в ремонте.

Производительность дробилок определена расчетным методом с учетом свойств дробимых руд, формы и конструкции приемных устройств, вида и конструктивных особенностей транспорта, технических характеристик дробилок.

Систематизация условий эксплуатации дробилок по свойствам дробимых пород и режимам работы выполнена на основе статистической обработки путем анализа и обобщения.

Таблица 1. Наиболее распространенные технологические схемы транспорта и приемные устройства дробильно-обогащительной фабрики

Table 1. The most common technological schemes for quarry transport and receiving devices for crushing and processing mills

Технологическая схема транспорта/Technological scheme of transport		Производительность, млн т/год Productivity million tons/year	Разгрузка транспорта Unloading vehicles		Приемное звено дробильного передела Receiving unit of crushing-and-concentrating plant
Автомобильно-железнодорожный транспорт Road and rail transport	1) Сборочный автомобильный транспорт (карьерные автосамосвалы) от забоев до ПП. 2) Магистральный железнодорожный транспорт (составы: тяговый агрегат + думпкары) от ПП в карьере до ДОФ. 1) Assembly road transport (mining dump trucks) from the faces to the RP. 2) Mains railway transport (trains: traction unit + dumpcars) from the RP in the quarry to the crushing and processing mills (CPM)	<10–15	Приемный бункер с питателем, подающим руду на щековые дробилки Receiving bin with feeder feeding ore to jaw crushers		
		>10–15	Приемный бункер с непосредственно установленной конусной дробилкой ККД Receiving bin with directly mounted coarse crusher		
Автомобильно-конвейерный транспорт (т. н. циклично-поточная технология – ЦПТ) Auto-conveyor transport (in-pit crushing and conveying technology – CCT)	1) Сборочный автомобильный транспорт (карьерные автосамосвалы) от забоев до ДПП. 2) Магистральный конвейерный транспорт от ДПП в карьере до ДОФ на стадию среднего дробления 1) Gathering road transport (mining dump trucks) from the bottom to the CRS. 2) The mains conveyor transport from the CRS in the quarry to the CPM at the standard cone crusher	<10–15	Сборочный автотранспорт Gathering road transport (mining dump trucks)	Приемный бункер с питателем, подающим руду на щековые дробилки Receiving bin with feeder feeding ore to jaw crushers	
		>10–15	Магистральный конвейер The mains conveyor transport	Приемный бункер с непосредственно установленной конусной дробилкой ККД Receiving bin with directly mounted coarse crusher	
Автомобильно-конвейерно-железнодорожный (как правило, после внедрения ЦПТ в существующий авто-ЖД транспорт) Auto-conveyor-rail (in most cases, after the introduction of the CCT in the existing auto-railway transport)	1) Сборочный автомобильный транспорт (карьерные автосамосвалы) от забоев до ДПП. 2) Промежуточный магистральный конвейерный транспорт от ДПП в карьере до ПП на борту карьера. 3) Магистральный железнодорожный транспорт (составы: тяговый агрегат + думпкары) от ПП на борту карьера до ДОФ 1) Gathering road transport (mining dump trucks) from the bottom to the CRS. 2) Intermediate mains conveyor transport from the CRS in the quarry to the RP on board the quarry. 3) Mains railway transport (trains: traction unit + dumpcars) from the RP on board the quarry to the CPM	>10–15	Приемный бункер стадии крупного дробления Receiving bin of coarse crushing stages		Бункер с конусной или щековой дробилкой Receiving bin with cone or jaw crusher
			Приемный бункер стадии среднего или мелкого дробления Receiving bin of stage medium or fine crushing		Бункер с питателем Receiving bin with feeder
			Рудный склад (в т. ч. усреднительный) с перегрузкой (подачей реclaimerом) на среднее дробление Ore storage (including averaging) with overload (feed by reclaimer) for medium crushing		Бункер с питателем. Подача конвейером на среднее дробление Receiving bin with feeder. Conveyor feed for medium crushing
Автомобильно-автомобильный Auto-Auto	1) Сборочный автомобильный транспорт (карьерные автосамосвалы) от забоев до ПП на поверхности. 2) Магистральные автопоезда от ПП до ДОФ 1) Gathering road transport (mining dump trucks) from the bottom to the surface on the surface. 2) Mains road trains from RP to CPM	<7–10	а) Разгрузка на «почву» рудного склада ДОФ или со специальной эстакады. Перегрузка погрузчиками в бункер ДОФ. б) Разгрузка в приемный бункер ДОФ a) Unloading at the bottom of the ore storage of the CPM or from a special flyover. Overload by loaders in the Receiving bin of CPM. b) Unloading into the bunker CPM		Приемный бункер с питателем, подающим руду на щековые дробилки Receiving bin with feeder feeding ore to jaw crushers
					Приемный бункер с установленной ККД Receiving bin with coarse crusher
Специальные виды карьерного транспорта (скиповые подъемники, ГПКД и др.) Special types of career transport (skip hoists, FC, etc.)	1) а) Сборочный автомобильный транспорт б) Полноприводные пневмоколесные или гусеничные самосвалы на крутонаклонных съездах 2) Промежуточный магистральный подъемник (скип, автомобильный, ГПКД). 3) Поверхностный магистральный транспорт (железнодорожный, автопоезда) 1) а) Gathering road transport б) Four-wheel drive pneumatic or crawler dump trucks at steep ramps 2) Intermediate main elevator (skip, automobile, FC). 3) Surface mains transport (railway, road train)	<10	а) Разгрузка на «почву» рудного склада ДОФ или со специальной эстакады. Перегрузка погрузчиками в бункер ДОФ. б) Разгрузка в приемный бункер ДОФ a) Unloading at the bottom of the ore storage of the CPM or from a special flyover. Overload by loaders in the Receiving bin of CPM. b) Unloading into the bunker CPM		Приемный бункер с питателем, подающим руду на щековые дробилки Receiving bin with feeder feeding ore to jaw crushers
					Приемный бункер с установленной ККД Receiving bin with coarse crusher

ДПП – дробильно-перегрузочный пункт, ПП – перегрузочный пункт; ГПКД – грузовая подвесная канатная дорога.

CRS – crushing and reloading station; RP – reloading point; FC – freight cableway.

Результаты исследования

Схемы загрузки приемных устройств ДОФ приведены на рис. 1. Анализ показал, что предельная интенсивность загрузки дробилки крупного дробления с целью максимального использования ее производительности определяется количеством мест разгрузки, продолжительностью разгрузки одного транспортного средства (самосвал, думпкар, погрузчик), скоростью обмена транспортных средств, равномерностью подачи транспорта на разгрузку.

Расчеты достижимой интенсивности загрузки (рис. 2) показали, что возможностями обеспечения наиболее стабильного высокопроизводительного по-

тока обладает автомобильный транспорт за счет высокой технологической «гибкости» и при этом значительной грузоподъемности (до 360 т).

На рис. 2 представлены зависимости производительности разных видов транспорта от их грузоподъемности с наложением производительности конусных дробилок разных модификаций (горизонтальные линии). На пересечении наклонных и горизонтальных линий определяется необходимая грузоподъемность. Неравномерность подачи транспорта на разгрузку уменьшает интенсивность ее загрузки, поэтому при коэффициенте неравномерности $K_n < 0,9$ она заметно снижается.

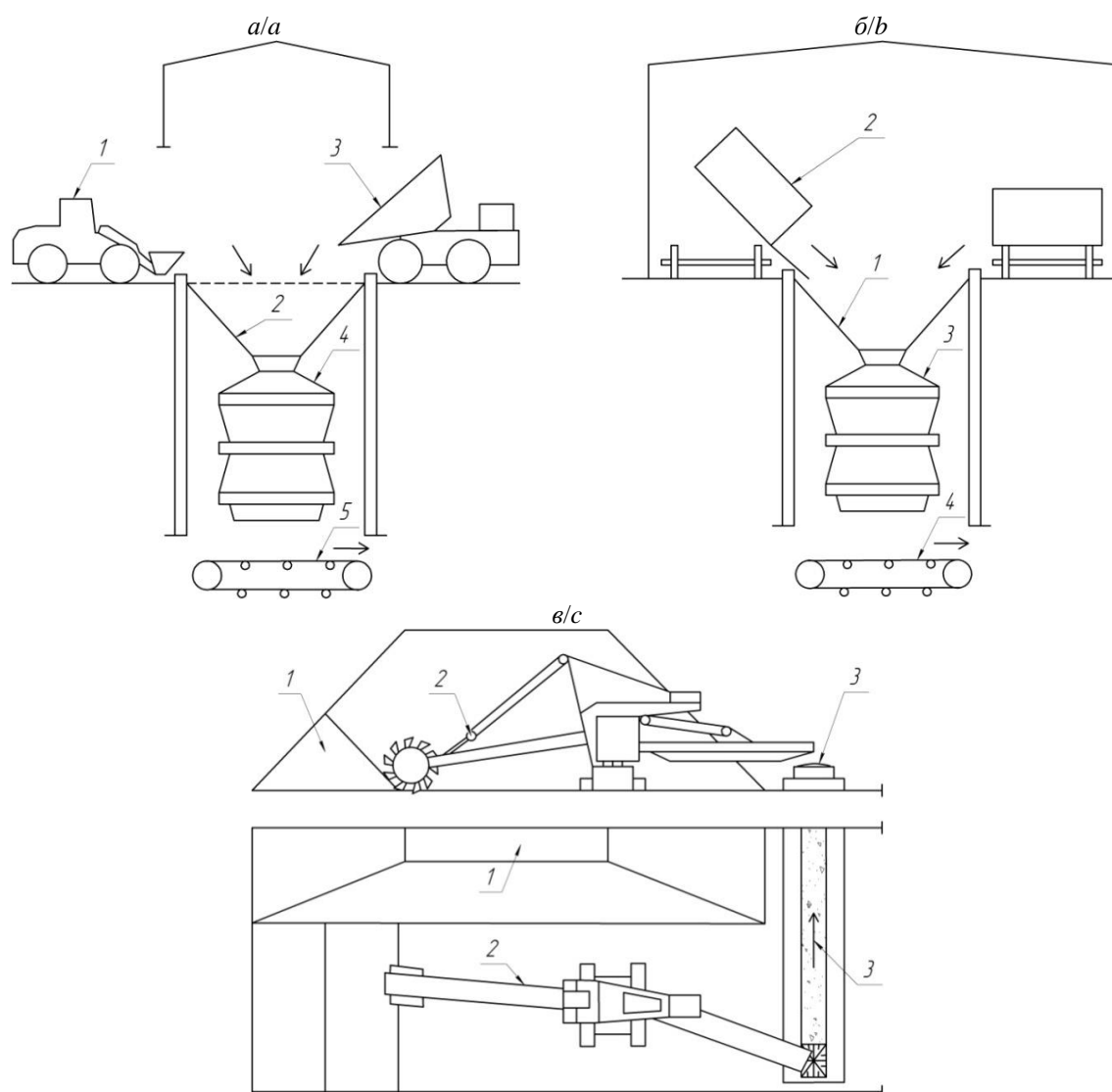


Рис. 1. Схемы приемных бункеров дробильно-обогащительных фабрик: а) разгрузка автомобильного транспорта – 3 (погрузчика – 1) в приемный бункер – 2, на дробилку – 4 и далее по технологической цепочке аппаратов – 5 на ДОФ; б) разгрузка железнодорожного транспорта – 2 в приемный бункер – 1, на дробилку – 3 и далее по технологической цепочке аппаратов – 4 на ДОФ; в) отгрузка руды с усреднительного склада – 1 цепным экскаватором или реклаймером – 2 с отгрузкой на конвейер – 3, доставляющий руду до ДОФ

Fig. 1. Schemes of receiving bins of crushing and processing plants: а) unloading quarry automobile transport – 3 (loader – 1) into the receiving bin – 2, to the crusher – 4 and then along the technological chain of devices – 5 to the crushing and processing plants; б) unloading railway transport – 2 into the receiving bin – 1, to the crusher – 3 and then along the technological chain of vehicles – 4 to the crushing and processing plants; в) unloading from the averaging ore storage – 1 with a chain excavator or reclaimer – 2 with unloading to the conveyor – 3, which delivers the ore to the crushing and processing plants

Погрузчики при перевалке руды из рудного склада вблизи приемного бункера ДОФ также могут обеспечить высокую стабильность потока, но обладают меньшей производительностью, а потому для загрузки современных форсированных дробилок, например, ККД-1500, как правило, требуется несколько (2–3 шт.) погрузчиков.

При высокой производительности железнодорожного транспорта, измеряемой в грузообороте (т·км), интенсивность его разгрузки ограничивается инертностью за счет увязанности транспортных сосудов (думпкаров) в единый состав, наличием ручного управления разгрузкой, увеличенным (в сравнении с автомобильным транспортом) временем обмена транспорта у приемного бункера. В связи с этим он

занимает среднее положение по интенсивности загрузки приемного бункера дробилки (рис. 2).

Отметим, что для интенсивной загрузки современной форсированной дробилки (производительность 5000–6000 т/ч) при одном разгрузочном месте у бункера требуются автосамосвалы высокой грузоподъемности (240–360 т). Поэтому целесообразно использование схем с двумя местами для одновременной разгрузки, что позволит обеспечить требуемый уровень даже при высокой неравномерности ($K_n=0,7$ и ниже) подачи автосамосвалов грузоподъемностью 90–130 т. Эта же схема дает перспективу для загрузки форсированных дробилок с производительностью 7000–7500 т/ч автосамосвалами грузоподъемностью 130–180 т, в зависимости от равномерности работы автотранспорта.

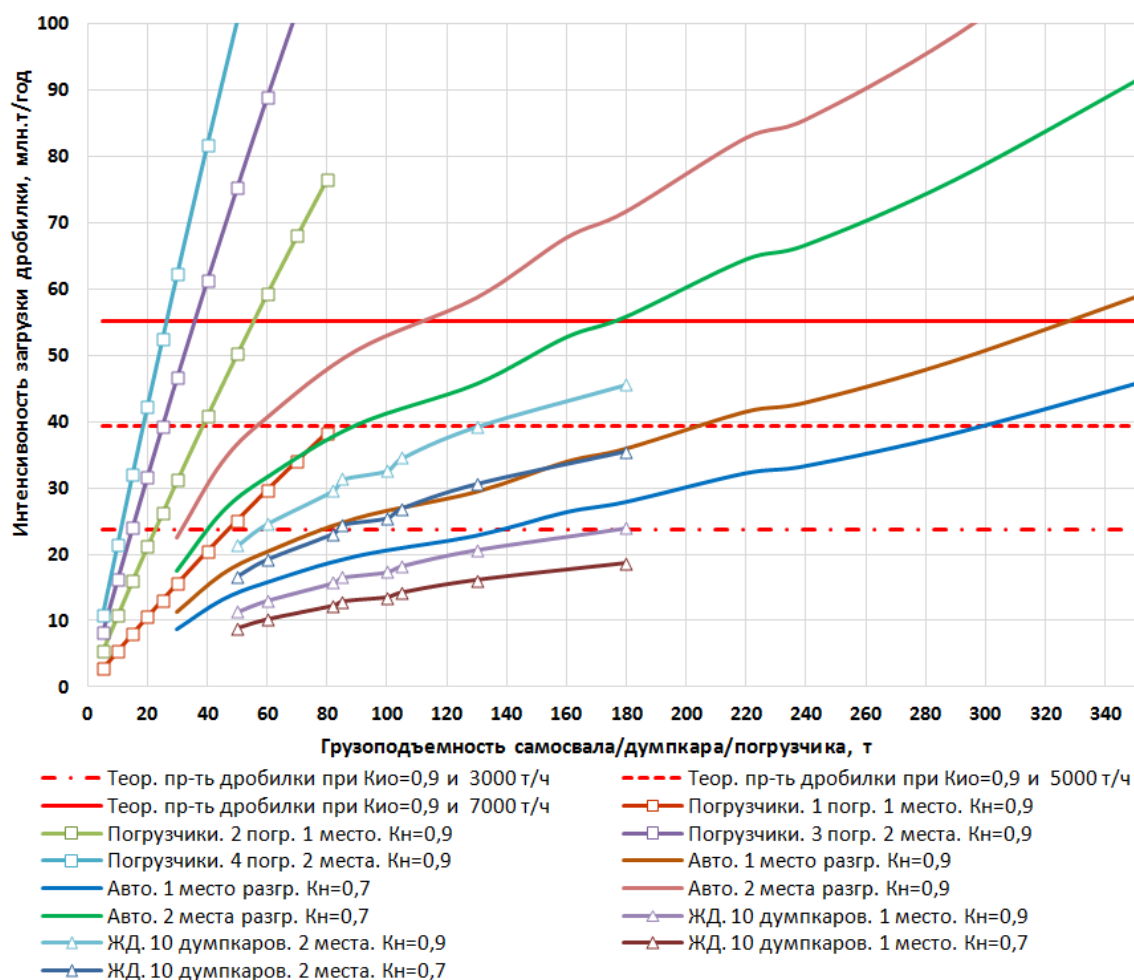


Рис. 2. Достижимая интенсивность загрузки приемного бункера (K_n – коэффициент равномерности подачи транспорта, равный отношению времени наличия транспорта на разгрузке к суммарному времени готовности дробилки к загрузке)

Fig. 2. Reachable receiving bin loading intensity (K_n – the coefficient of evenness of transport supply equal to the ratio of transport presence time at unloading to the total time of the crusher readiness for loading)

Для железнодорожного транспорта не исчерпаны возможности уже ставшей классической схемы с двусторонней загрузкой бункера. При этом для форсированных дробилок (5000–6000 т/ч) необходимо применение думпкаров повышенной грузоподъемности (160–180 т) при обеспечении большей равномерности подачи составов на разгрузку ($K_n=0,87–0,95$) за счет

технологических мероприятий и совершенствования схемы путевого развития. Схемы с одним местом разгрузки подходят для щековых дробилок при годовой производительности до 14 млн т/год.

Вторая группа из наиболее значимых факторов, определяющих производительность системы «транспорт – приемный бункер – дробилка крупного дробле-

ния – смежное оборудование», относится к надежности работы дробилки и смежного с ней оборудования.

Анализ надежности необходим для выявления узких мест в системе и для поиска компонентов или подсистем с низкой надежностью для заданной проектной производительности, а также полезен для определения интервалов планирования и организации технического обслуживания [5, 6]. Использование информации об эксплуатационной надежности и готовности к работе оборудования позволяет максимизировать общую производительность системы [7].

Исследования показателей наработки узлов и деталей конусных и щековых дробилок на горнодобывающих предприятиях позволили выявить основные факторы, влияющие на их эксплуатационную надежность, требуемую периодичность, объем ремонтных работ и время производительной работы:

- 1) Крепость перерабатываемого материала. Высокая прочность вызывает значительные нагрузки в узлах трения, повышенные нагрузки на корпусные детали, повышенный износ броней (чаще в виде трещин, местного сквозного износа).
- 2) Абразивность перерабатываемого материала. Характеризует способность горных пород изнашивать рабочие органы в процессе дробления (измельчения) при трении. Например, в случае относительно непрочных, но высокоабразивных пород, брони дробилки будут изнашиваться практически равномерно по толщине (при правильной загрузке дробилки), характер износа – истирание.
- 3) Крупность кусков питания и степень дробления. Влияют на нагрузки в узлах и механизмах, а увеличение данных показателей ведет к повышению потребляемой мощности. Наличие большого количества кусков, близких к максимальной крупности питания, существенно увеличивает нагрузку на привод и корпус дробилки.
- 4) Объем перерабатываемой горной массы. Производительность напрямую влияет на износ и расход ресурса всех узлов дробилки.
- 5) Попадание недробимого тела в зону дробления. Не допускается, поскольку создает ударные нагрузки и, как правило, вызывает повреждение элементов дробилки.
- 6) Соблюдение периодичности и качество выполнения ТОиР, качество применяемых запасных частей и материалов, своевременность выявления зарождающихся неисправностей и предотвращение их развития до ближайшего ремонта либо устранения. Влияет на износ и расход ресурса всех узлов дробилки. Вероятность отказа оборудования зависит от его качества, а также от условий эксплуатации и эффективности обслуживания. Поддержание оборудования в нормальном рабочем состоянии и сохранение необходимой производительности требует надлежащего технического обслуживания в течение всего жизненного цикла всего оборудования, входящего в одну систему [8]. Для эффективной эксплуатации необходимо сокращать время простоя оборудования, повышать его надежность и ремонтпригодность [9–12].

Интегральным показателем, отражающим надежность работы дробилки во времени, простои в техническом обслуживании и ремонтах (ТОиР), а значит ее производительность, является коэффициент готовности [13, 14].

В общем случае, согласно ГОСТ 27.002 [15], различают *коэффициент внутренней готовности*, определяемый при проектировании для расчетных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, и *коэффициент эксплуатационной готовности*, определяемый для реальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта по фактическим показателям. Применительно к дробилкам термины «коэффициент технической готовности дробилки» и «коэффициент внутренней готовности дробилки» предлагается определять следующим образом.

Коэффициент внутренней готовности дробилки:

$$K_{ВГ(Д)} = \frac{T_{э(Д)}}{T_{э(Д)} + T_{ППР(Д)}} = \frac{T_{КВФ} - T_{ППР(Д)}}{T_{КВФ}},$$

где $T_{э(Д)}$ – суммарное время пребывания дробилки в работоспособном состоянии, в рассматриваемом периоде эксплуатации, ч; $T_{ППР(Д)}$ – суммарное время пребывания дробилки в неработоспособном состоянии в связи с ее планово-предупредительными техническими обслуживаниями и ремонтами, заложенными в технологическом регламенте (производителя оборудования или эксплуатирующего предприятия), ч; $T_{КВФ}$ – календарный фонд времени за рассматриваемый период, ч.

Коэффициент технической готовности дробилки – это отношение суммарного времени пребывания дробилки в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к суммарному времени пребывания дробилки в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом, за тот же период:

$$K_{ТГ(Д)} = \frac{T_{э(Д)}}{T_{э(Д)} + T'_{ППР(Д)} + T_{НР(Д)}} = \frac{T_{КВФ} - T'_{ППР(Д)} - T_{НР(Д)}}{T_{КВФ}},$$

где $T'_{ППР(Д)}$ – суммарное время пребывания дробилки в неработоспособном состоянии в связи с ее планово-предупредительными техническими обслуживаниями и ремонтами, предусмотренными по графику предприятия, эксплуатирующего дробилку, в рассматриваемом периоде эксплуатации, ч; $T_{НР(Д)}$ – суммарное время пребывания дробилки в неработоспособном состоянии в связи с простоями из-за внеплановых ее ремонтов в рассматриваемом периоде эксплуатации, ч.

Коэффициент технической готовности комплекса «дробилка + смежное оборудование» можно определить по формуле:

$$K_{ТГ(К)} = \frac{T_{э(Д)}}{T_{э(Д)} + T'_{ППР(Д)} + T_{НР(Д)} + T_{ТОиР(со)}} = \frac{T_{КВФ} - T'_{ППР(Д)} - T_{НР(Д)} - T_{ТОиР(со)}}{T_{КВФ}},$$

где $T_{ТОиР(со)}$ – суммарное время пребывания смежного оборудования в неработоспособном состоянии в связи с его планово-предупредительными, а также внеплановыми ремонтами, не совмещенными во времени с ТОиР дробилки, ч.

На рис. 3 приведены графики зависимости достижимой годовой выработки (млн т/год) конусной дробилки крупного дробления ККД-1500/180 от коэффициента готовности (K_r) при разной степени форсирования дробилки (часовой производительности) и коэффициенте использования во времени ($K_{ив}$).

Видно, что снижение коэффициента готовности дробилки на 5 % (наклонные прямые графики) ведет к падению годовой производительности на 2–3 млн т.

Современные дробилки, например производимые ПАО «Уралмашзавод», обеспечивают значительно более высокую производительность в сравнении с их ранними модификациями 1980-х гг. выпуска (которые до настоящего времени продолжают эксплуатироваться на ряде горнодобывающих предприятий ввиду их большого ресурса). Так, для АО «Стойленский ГОК» спроектирована модификация, обеспечивающая производительность 6000 т/ч при крупности дробленого продукта 300 мм [16]. Поэтому рациональное использование производственной мощности форсированных дробилок является актуальной задачей, поскольку час простоя по технологическим или техническим причинам для более мощного оборудования обходится дороже.

Вертикальными линиями на рис. 3 показаны достижимые коэффициенты внутренней готовности ($K_{вг}$) дробилки ККД-1500 производства ПАО «Уралмашзавод» в стандартных условиях ($K_{вг(д)}=0,98$) и особо тяжелых условиях ($K_{вг(д)}=0,93$) эксплуатации (характеристику условий см. в табл. 2). Они рассчитаны по данным «Регламента на техническое обслуживание и ре-

монт», разработанного ИГД УрО РАН по заказу ПАО «Уралмашзавод» [17], и отражают теоретически достижимый уровень технической готовности дробилки и соответствующую ему годовую производительность.

Ряд факторов в реальных условиях эксплуатации обуславливают снижение коэффициента готовности в связи с внеплановыми остановками, ремонтами (они могут быть вызваны, например, попаданием недробимого тела или прохождением сверхгабаритного куска горной массы в питании и др.). В итоге на практике $K_{т(д)}$ обычно характеризуется величиной 0,92–0,96, в отдельных случаях снижаясь до 0,89. Это приводит к падению годовой выработки на 1–2 млн т для нефорсированных дробилок (4000 т/ч) и на 2–4 млн т для форсированных (6000 т/ч).

Поскольку дробилки не могут выполнять технологические задачи сами по себе, они всегда включены в комплексы оборудования (как минимум непосредственно связаны с приемным бункером и разгрузочным конвейером, чаще через поддробильный бункер и питатель). Поэтому выполнение плановых и внеплановых ремонтов всего комплекса взаимосвязаны во времени. Это накладывает дополнительные затраты времени на ТОиР и, следовательно, снижает $K_{т(д)}$. На рис. 3 этот диапазон коэффициентов готовности обозначен $\Delta K_{т(к)}$ ($K_{т(к)}$ комплекса). Практика горнодобывающих предприятий показывает, что $K_{т(к)}$ может составлять порядка 0,87–0,95, а в отдельных случаях, ввиду технологических особенностей дробильного передела и низкого уровня организации технической эксплуатации, $K_{т(к)}$ опускается до 0,8.

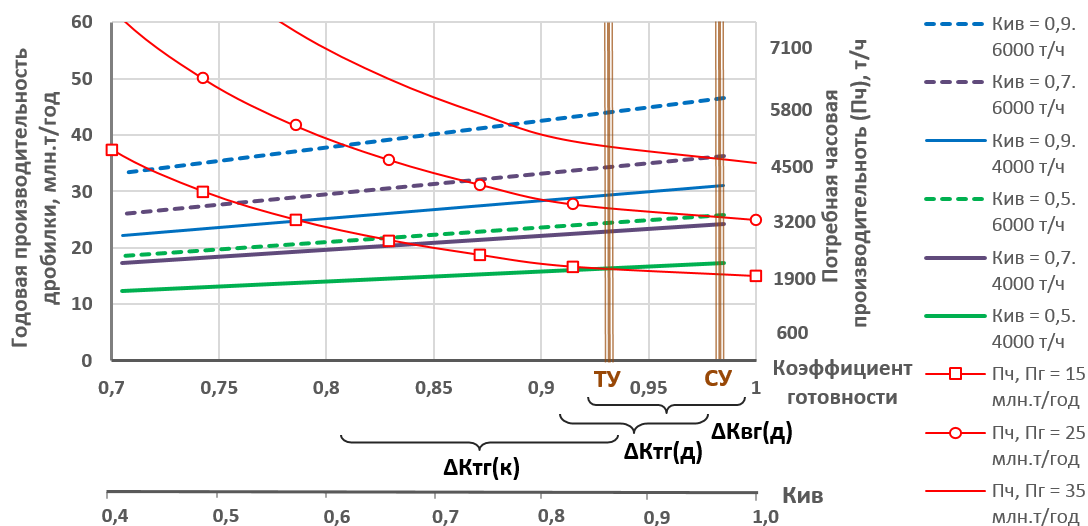


Рис. 3. Достижимая годовая производительность дробилки ККД-1500/180 ПАО «Уралмашзавод» (модификации с производительностью 4000 и 6000 т/ч) в зависимости от коэффициентов готовности ($K_{мг(д)}$, $K_{мг(к)}$, $K_{вг}$) и использования во времени ($K_{ив}$), а также потребная часовая производительность (P_{ch}) в зависимости от коэффициента использования во времени ($K_{ив}$) при разной плановой годовой (P_g) производительности (ТУ – тяжелые условия; СУ – стандартные условия; $\Delta K_{мг(д)}$, $\Delta K_{мг(к)}$, $\Delta K_{вг(д)}$ – диапазоны изменений соответственно: коэффициентов технической готовности дробилки и комплекса «дробилка + смежное оборудование», коэффициента внутренней готовности дробилки)

Fig. 3. Achievable annual capacity of the KKD-1500/180 crusher of «Uralmashplant» JSC (modifications with a capacity of 4000 and 6000 t/h) depending on the availability and time-use factors ($K_{ив}$), as well as the required hourly output (P_{ch}), depending on the required annual (P_g) capacity (DC – difficult conditions; SC – standard conditions; $\Delta K_{т(к)}$, $\Delta K_{т(д)}$ – ranges of changes, respectively: technical readiness coefficients of the crusher and the «crusher + related equipment» complex, crusher internal readiness coefficient)

Таблица 2. Характеристика условий дробления пород

Table 2. Description of rock crushing conditions

Характеристика дробимых пород Description of crushed rocks	Стандартные условия Standard conditions	Высокоабразивные крепкие руды Highly abrasive strong ores
Плотность в целике/Densities in the rear	2–3 т/м ³ (t/m ³)	до 4 т/м ³ up to 4 t/m ³
Насыпная плотность/Bulk density	2 т/м ³ (t/m ³)	до 2,5 т/м ³ up to 2.5 t/m ³
Влажность/Humidity	не выше 4 %/not higher than 4 %	
Абразивность (Ai) по Бонду Bond abrasiveness (Ai)	средняя (Ai не выше 0,4 г) average (Ai not higher than 0,4 g)	крайне высокая (Ai=0,5–0,7 г и более) extremely high (Ai=0,5–0,7 g or more)
Предел прочности пород при одноосном сжатии Breaking strength under uniaxial compression	100–110 Мпа (MPa)	140–170 МПа Вар. II*: 180–250 МПа 140–170 MPa Variant II*: 180–250 MPa
Режим работы/Mode of operation	K _{ив} =0,75–0,85 K _{iv} =0,75–0,85	K _{ив} =0,75–0,85 Вар. II*: K _{ив} =0,86–0,95 K _{iv} =0,75–0,85 Variant II*: K _{iv} =0,86–0,95
Крупность кусков Sized rock	В пределах технической характеристики дробилки Within the technical specifications of the crusher	
Попадание небросимых тел Hazardous bodies	не допускается, носит единичный характер/not allowed, is single	
Ремонт выполняется оригинальными запасными частями, поставляемыми ПАО «Уралмашзавод», и рекомендованными материалами Repair is carried out with recommended materials and original spare parts supplied by JSC Uralmashzavod		

*Вар. II – наиболее тяжелые условия работы высокофорсированных дробилок.

*Variant II – the most difficult working conditions for high-performance crushers.

Существенное влияние на производительность оказывают организационно-технологические простои, характеризующиеся коэффициентом использования дробильного оборудования во времени (K_{ив}). По рис. 3 видно, что для поддержания заданной годовой производительности с уменьшением K_{ив} требуется все больше форсировать дробилку, т. е. увеличивать ее производительность (графики красного цвета). Причем, если при K_{ив}=0,9–1,0 зависимость близка к прямой, то в диапазоне K_{ив}<0,9 она изменяется возрастающими темпами (становится криволинейной).

В целом степень полезного использования дробилки характеризуется экстенсивным коэффициентом использования оборудования (часто его называют просто K_{ио}), который является интегративным показателем, учитывающим все организационно-технологические и ремонтно-технические простои. Его можно выразить через описанные выше коэффициенты:

$$K_{ио} = K_{тг(к)} * K_{ив} = \left[K_{тг(д)} - \frac{T_{ТОиР(со)}}{T_{КВФ}} \right] * K_{ив} =$$

$$= \left[\left(K_{вг(д)} - \frac{T_{НР(д)}}{T_{КВФ}} \right) - \frac{T_{ТОиР(со)}}{T_{КВФ}} \right] * K_{ив},$$

где K_{ив} – коэффициент использования оборудования во времени, равный отношению времени работы оборудования к общему времени нахождения в готовом к работе состоянии (т. е. за вычетом простоев в ТОиР).

Целевое значение уровня технической готовности дробилки (K_{тг(д)}) должно быть близким к ее коэффициенту внутренней готовности (K_{вг(д)}). Он определяется исходя из нормированного ремонтного цикла, который устанавливается с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей оборудования, режима его работы и физико-механических свойств

дробимых горных пород (табл. 2). На рис. 4 приведены значения K_{вг} и K_{тг} для основных дробилок крупного, среднего и мелкого дробления типоразмерной линейки ПАО «Уралмашзавод» при агрегатно-узловом методе ремонта. Коэффициенты готовности рассчитаны по реальным данным действующих ГОКов.

Несмотря на отклонения данных от строгих зависимостей, связанные с различными схемами цепи аппаратов дробильного передела, физико-механическими свойствами руд, организацией ТОиР, по рис. 4 выделяются основные закономерности:

- 1) В стандартных условиях коэффициент технической готовности дробилки незначительно отличается от K_{вг}, поскольку мала вероятность сверхнормативных нагрузок, попадания небросимых тел. В тяжелых условиях (рис. 4, б, в) «просадка» K_{тг} относительно K_{вг} значительно больше.
- 2) В наиболее жестких условиях работы по варианту II (прочность ~200 МПа, абразивность 0,6–0,7, K_{ив}=0,87–0,9) «просадка» K_{тг} относительно K_{вг} мала. Это объясняется частыми плановыми ремонтами, а потому минимальной вероятностью в эти короткие периоды внештатных ситуаций и неплановых ремонтов.
- 3) Коэффициент готовности в комплексе (K_{тг(к)}) наименьший у щековых дробилок, что связано с невозможностью их работы под завалом руды, а потому они всегда сопряжены с питателем, часто неподвижным (колосниковым) грохотом и др. Это вызывает дополнительные затраты времени на ТОиР, в том числе неплановые.
- 4) Дробилки среднего и мелкого дробления серии КСМД-2200 имеют больший диапазон изменения

$K_{тг}$, что связано с высокой зависимостью от возникновения возможных сверхнормативных нагрузок (попадание недробимых тел) из-за малого размера и технологического назначения разгрузочной щели. В то же время влияние факторов

связанности комплекса не столь существенно, так как дробилки чаще всего используются в параллельных технологических потоках по 4–12 шт. и остановка на ремонт одной из них практически не влияет на работу остальных.

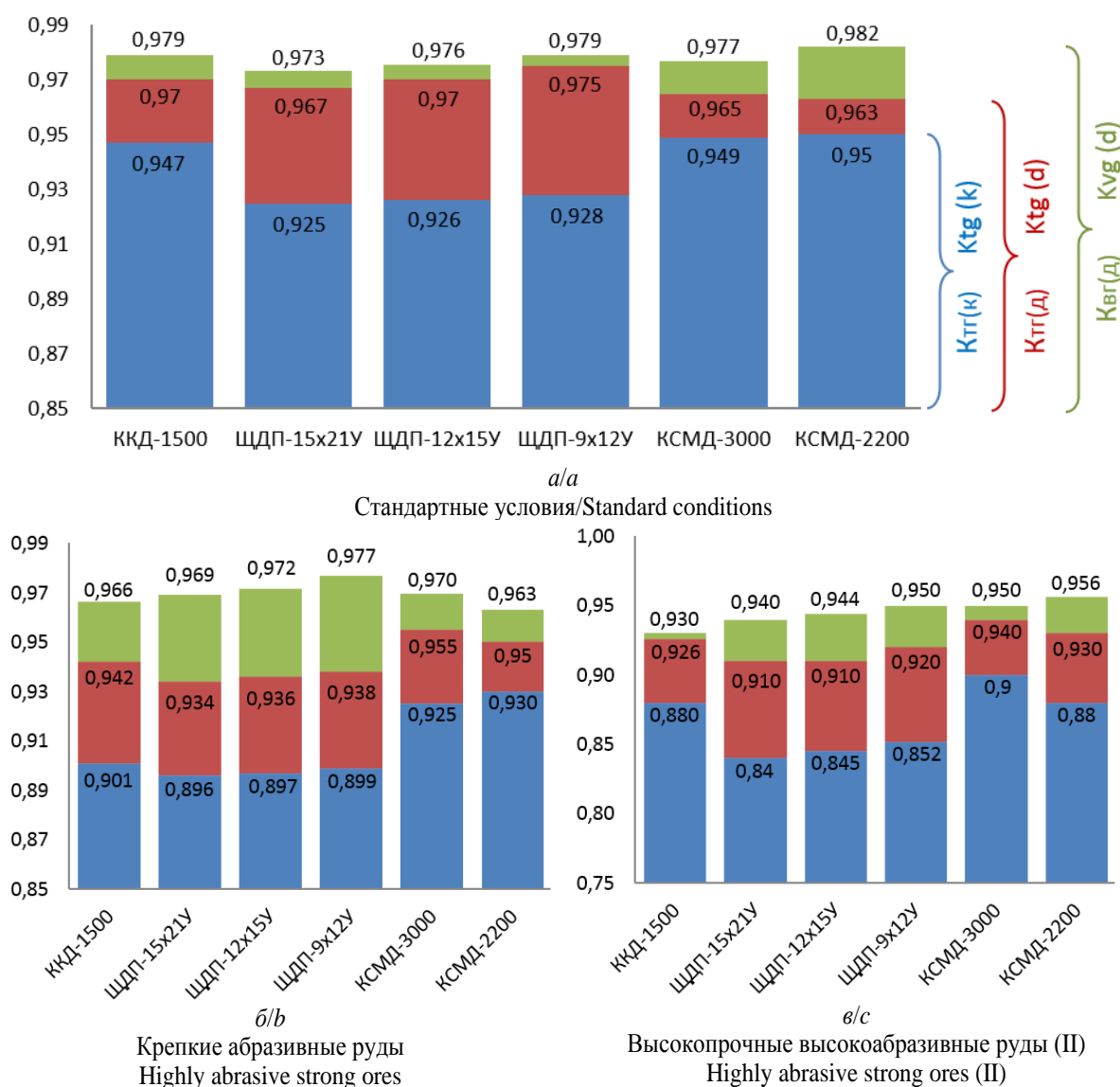


Рис. 4. Нормализованные значения коэффициентов готовности для разных моделей дробилок ($K_{mz(k)}$ – коэффициент технической готовности комплекса, $K_{mz(d)}$ – коэффициент внутренней готовности дробилки)

Fig. 4. Normalized availability factors for different crusher models ($K_{tr}(k)$, $K_{tg}(k)$, $K_{tr}(d)$ – technical readiness coefficients of the crusher and the «crusher + related equipment» complex, coefficient of internal ready crusher, respectively)

Анализ опыта эксплуатации дробилок позволяет сформулировать требования к организации их работы и порядку загрузки для обеспечения высокой производительности за счет максимального использования технических возможностей:

1. Оптимизировать систему технической эксплуатации (часто ее сводят к системе ТОиР, что ограничивает возможности управления параметрами системы) для достижения максимальных коэффициентов готовности. Целевая функция при оптимизации должна предполагать повышение коэффициента

$K_{тг(k)}$ до уровня, близкого к $K_{тг(d)}$, коэффициента $K_{тг(d)}$ – до уровня, близкого к номинальному $K_{br(d)}$, установленному изготовителем оборудования, а коэффициента $K_{ив}$ – к 1:

$$K_{ио} = \begin{cases} K_{тг(k)} \rightarrow K_{тг} \\ K_{тг} \rightarrow K_{br} \\ K_{ив} \rightarrow 1 \end{cases} \rightarrow \max.$$

Это требует применения прогрессивных методов с переходом от планово-предупредительной системы к эффективной системе обеспечения работоспособности

[18] с выстраиванием системы раннего выявления неисправностей и прогнозной аналитики на базе цифровых систем, системы непрерывного мониторинга качества применяемых запасных частей и материалов. Кроме этого, для повышения эффективности процесса рудоподготовки можно проводить мероприятия организационного и технологического характера при выполнении всех видов ремонтных воздействий (техническое обслуживание, текущие и капитальные ремонты) [19].

Таким образом, для выявления резервов совершенствования технической эксплуатации оборудования необходимо наряду с интегральным показателем – коэффициентом использования оборудования – внедрять раздельный учет коэффициентов внутренней и технической готовности, а также коэффициента использования во времени.

2. Схема загрузки приемного бункера должна обеспечивать заданную часовую интенсивность загрузки с учетом грузоподъемности транспортных средств и равномерности их подачи. Для современных и перспективных конусных дробилок крупного дробления с производительностью 5000–7000 т/ч рекомендуется обеспечить минимум два места для одновременной разгрузки транспорта в каждую дробилку, при этом грузоподъемность транспорта – не менее 115–130 т на один транспортный сосуд, либо погрузчик с ковшом не менее 15–17 м³.
3. Обеспечить равномерность подачи транспорта на разгрузку (коэффициент равномерности не ниже 0,8). Эта задача может решаться за счет оптимизирующих автоматизированных систем диспетчеризации [20] совместно с повышением производительности системы выемочно-погрузочного и транспортного оборудования.
4. При невозможности достижения высокой равномерности подачи транспорта необходимо увеличивать производительность дробилки (форсировать ее) путем модернизации под требуемую часовую производительность [16, 21].

Выводы

1. В условиях необходимости наращивания производственной мощности действующих горно-обогатительных комбинатов важным и реализуемым является использование резервов повышения производительности действующего дробильного оборудования. Приведенные расчеты позволили

установить обоснованные величины этих резервов: 10–30 % за счет обеспечения равномерной подачи транспорта на разгрузку, 5–10 % за счет оптимизации порядка работы цепи аппаратов ДОФ во времени, 3–5 % за счет совершенствования технического обслуживания и ремонта.

2. Для стабильной высокопроизводительной работы транспортно-обогащительного передела горного предприятия необходимо одновременно налаживать организацию взаимодействия транспортного и дробильного оборудования и формировать эффективную систему обеспечения работоспособности этого оборудования, в том числе за счет максимального использования технических возможностей:
 - оптимизировать систему технической эксплуатации дробильного оборудования для достижения максимальных коэффициентов готовности, в том числе за счет внедрения раздельного учета коэффициентов внутренней и технической готовности, а также коэффициента использования во времени;
 - схема загрузки приемного бункера и применяемое дробильное оборудование должны обеспечивать заданную часовую интенсивность загрузки с учетом грузоподъемности транспортных средств и равномерности их подачи;
 - обеспечить равномерность подачи транспорта на разгрузку (коэффициент равномерности не ниже 0,8).
3. Одним из значимых инструментов повышения производительности и эффективности транспортной системы карьера и дробильного передела является внедрение цифровых систем прогнозной аналитики и оптимизированного управления.
4. Для дробилок среднего и мелкого дробления проблема попадания недробимых тел – это один из ключевых негативных факторов, вызывающий либо нарушение работоспособности дробилок, либо простои линии во время удаления недробимых тел с ленты конвейера при их своевременном обнаружении. Следовательно, остро стоит проблема разработки эффективных систем быстрого детектирования и удаления из потока недробимых тел (прежде всего металлических).

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № ГР АААА-А19-119020790025-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Схемы циклично-поточной технологии при различном залегании месторождений полезных ископаемых (обзор применяемых схем ЦПТ) / В.А. Бурсенев, Г.Д. Кармаев, А.В. Семенкин, И.Г. Сумина // Проблемы недропользования. – 2018. – № 4 (19). – С. 13–21. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.013
2. Проблемы магистрального транспортирования руды от удаленных кимберлитовых месторождений / П.И. Тарасов, А.Г. Журавлев, В.А. Черепанов, М.В. Исаков, В.Р. Баланчук, А.Н. Акишев, С.Л. Бабаскин // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 25–31.
3. Зырянов И.В., Кондратюк А.П. Рациональная конфигурация многосвязных автопоездов для транспортировки кимберлитовой

породы АК «Алроса» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S24. – С. 229–239.

4. Features of modern approach to selection of haulage systems for open pit diamond mines in Yakutia / V.L. Yakovlev, I.V. Zyryanov, A.G. Zhuravlev, V.A. Cherepanov // Journal of Mining Science. – 2018. – V. 54. – № 6. – P. 979–987. DOI: 10.1134/S1062739118065131
5. Barabady J., Kumar U. Reliability analysis of mining equipment: a case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran // Reliability Engineering and System Safety. – 2008. – V. 93. – Iss. 4. – P. 647–653.
6. Barabady J. Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran // Annual Reliability and Maintainability Symposium, International Symposium on Product

- Quality and Integrity. – Alexandria, Virginia, USA, 2005, January 24–27. – Piscataway, NJ: IEEE Communications Society, 2005. – P. 109–115.
7. Availability based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints / R. Mena, E. Zio, F. Kristjanpoller, A. Arata // International Journal of Mining Science and Technology. – 2013. – V. 23. – № 1. – P. 113–119.
 8. Tsai Y.T., Wang K.S., Tasi L.C. A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems // Reliability Engineering & System Safety. – 2004. – V. 84. – № 3. – P. 261–270.
 9. Hall R.A., Daneshmend L.K. Reliability modeling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 2003. – V. 17. – № 3. – P. 139–155.
 10. Ghodrati B., Kumar U. Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach: a case study in Kiruna Mine, Sweden // Journal of Quality in Maintenance Engineering. – 2005. – V. 11. – № 2. – P. 169–184.
 11. Dhillon B.S., Anude O.C., Mining equipment reliability: a review // Microelectronics and Reliability. – 1992. – V. 32. – № 8. – P. 1137–1156.
 12. Lewis M.W., Steinberg L. Maintenance of mobile mine equipment in the information age // Journal of Quality in Maintenance Engineering. – 2001. – V. 7. – № 4. – P. 264–274.
 13. Усов С.В., Белов С.В. Повышение коэффициента технической готовности погрузочно-доставочного комплекса карьера // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XVI международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады 12–13 апреля 2018 г. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2018. – С. 350–352.
 14. Лагунова Ю.А., Бруслова О.М. Влияние коэффициента готовности на структуру ремонтного цикла дробильного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № S1-1. – С. 102–107.
 15. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 39 с.
 16. Стойленский ГОК и УЗТМ открыли новую эпоху в сегменте дробления руды. URL: <https://uralmash-kartex.ru/stojlenskij-gok-i-uztm-otkryili-novuyu-epoxu-v-segmente-drobleniya-rudyi> (дата обращения 30.04.2020).
 17. Методический подход к разработке регламентов технического обслуживания и ремонта дробильного оборудования горнодобывающих предприятий / А.Г. Журавлев, М.А. Чендырев, И.А. Глебов, В.А. Черепанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 543–556. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-543-556.
 18. Андреева Л.И., Красникова Т.И., Ушаков Ю.Ю. Методология формирования эффективной системы обеспечения работоспособности горной техники // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 5. – С. 92–106.
 19. Андреева Л.И. Оценка резервов повышения эффективности процесса рудоподготовки в АО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 1. – С. 185–192. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-185-192
 20. Журавлев А.Г., Ченцов П.А. Возможности автоматизированной оптимизации работы транспортных систем карьеров на основе мультиагентного подхода // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11 (СЦ 37). – С. 141–150. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-141-150.
 21. Лагунова Ю.А., Фуринов В.О., Федулов К.А. Конусные дробилки ПАО «Уралмашзавод» для конкретных условий эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 1 (135). – С. 27–33.

Поступила 22.10.2020 г.

Информация об авторах

Журавлев А.Г., кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт горного дела УрО РАН.

Черепанов В.А., научный сотрудник, начальник лаборатории неразрушающего контроля, Институт горного дела УрО РАН.

UDC 622.271.3.06:621.926

RESERVES TO INCREASE PRODUCTIVITY OF «QUARRY TRANSPORT – CRUSHING-AND-CONCENTRATING PLANT» SUBSYSTEM TAKING INTO ACCOUNT CRUSHING EQUIPMENT UTILIZATION FACTORS

Artem G. Zhuravlev¹,
juravlev@igduran.ru

Vladimir A. Cherepanov¹,
transport@igduran.ru

¹ Institute of Mining of Ural branch of RAS,
58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russia.

The relevance. Under current conditions, when it is necessary to increase the production capacity of existing mining-and-processing integrated works, the growth in productivity of the quarry cannot be considered in isolation from the capabilities of crushing and processing mills. When solving issues of increasing the capacity of quarry transport, it is necessary to pay attention to optimization of its interaction with the primary stages of enrichment production, and for this purpose it is necessary to consider it together with the link of main transport as a single technological system.

The main aim of the study is to identify reserves for increasing the productivity of the subsystem enterprise «quarry transport – crushing-and-concentrating plant» taking into account the utilization factors of crushing equipment based on a synthesis of experience in its operation and the requirements for operational reliability prevailing in modern conditions.

Objects: quarry transport and crushing equipment

Methods: motion-time study, statistical data processing, systematization, analysis and generalization, performance calculation

Results. The most common technological schemes of transport and crushing equipment used at modern mining and processing plants are structured. The key limiting factors for increasing productivity for the subsystem of the mining enterprise «quarry transport – crushing-and-concentrating plant» are identified. Calculations of the achievable loading intensity by various mining vehicles for stable high-performance crushers work were made. The reliability indicators of crushers are determined and calculated. The main factors affecting their operational reliability, the required frequency and amount of repair work, as well as the time of productive work are identified. An analysis of the operating experience of crushers is carried out and the requirements for the organization of their work and the loading order are formulated to ensure high performance. In conditions of necessity to increase production capacity of existing mining and processing plants, it is important and feasible to use reserves to increase productivity of existing crushing equipment: 10–30 % due to provision of uniform supply of transport for unloading, 5–10 % due to optimization of operation procedure of the crushing and processing plant circuit in time, 3–5 % due to improvement of maintenance and repair. At the same time, the increase in the utilization factor of equipment of crushing and enrichment factories should be considered in relation to operation of technological quarry transport. For the stable high-performance work of transportation and processing facilities of a mining company, it is necessary to simultaneously organize the interaction between transport and crushing equipment and form an effective system to ensure the operability of this equipment, including by maximizing the use of technical capabilities.

Key words:

Quarry transport, crusher, receiving bin, availability rate, efficiency, productivity, crushing equipment.

The study was carried out according to the State Task no. GR AAAA-A19-119020790025-4.

REFERENCES

1. Bersenev V.A., Karmaev D.G., Semenkin A.V., Sumina I.G. Schemes of cyclic-flow technology by various bedding of mineral deposits (reviewing of existing and proposed schemes of CFT). *Problemy nedropol'zovaniya*, 2018, no. 4, pp. 13–21. In Rus. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.013.
2. Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A., Isakov M.V., Balanchuk V.R., Akishev A.N., Babaskin S.L. Problemy magistral'nogo transportirovaniya rudy ot udalennykh kimberlitovykh mestorozhdeniy [Mainline ore transportation problems on the remote kimberlite fields]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2014, no. 5, pp. 25–31.
3. Zyryanov I.V., Kondratyuk A.P. Rational configuration of multilink trucks for transportation kimberlite rocks of AK ALROSA. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2017, no. S24, pp. 229–239. In Rus.
4. Yakovlev V.L., Zyryanov I.V., Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A. Features of modern approach to selection of haulage systems for open pit diamond mines in Yakutia. *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, no. 6, pp. 979–987. DOI: 10.1134/S1062739118065131.
5. Barabady J., Kumar U. Reliability analysis of mining equipment: a case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, vol. 93, Iss. 4, pp. 647–653.
6. Barabady J. Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran. *Annual Reliability and Maintainability Symposium, International Symposium on Product Quality and Integrity*. Alexandria, Virginia, USA, 2005, January 24–27. Piscataway, NJ, IEEE Communications Society, 2005. pp. 109–115.
7. Mena R., Zio E., Kristjanpoller F., Arata A. Availability based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 113–119.
8. Tsai Y.T., Wang K.S., Tasi L.C. A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2004, vol. 84, no. 3, pp. 261–270.
9. Hall R.A., Daneshmend L.K. Reliability modeling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2003, vol. 17, no. 3, pp. 139–155.
10. Ghodrati B., Kumar U. Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach: a case study in Kiruna

- Mine, Sweden. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2005, vol. 11, no. 2, pp. 169–184.
11. Dhillon B.S., Anude O.C. Mining equipment reliability: a review. *Microelectronics and Reliability*, 1992, vol. 32, no. 8, pp. 1137–1156.
 12. Lewis M.W., Steinberg L. Maintenance of mobile mine equipment in the information age. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2001, vol. 7, no. 4, pp. 264–274.
 13. Usov S.V., Belov S.V. Povyshenie koeffitsienta tekhnicheskoy gotovnosti pogruzочно-dostavоchnogo kompleksa karera [Increase of the coefficient of technical readiness for loading and delivery of complex career]. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Sbornik trudov XVI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Chleniya pamyati V.R. Kubacheka»* [Technological equipment for the mining and oil and gas industries. Proc. of the XVI international scientific and technical conference «Readings in Memory of V.R. Kubachek»]. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ., 2018. pp. 350–352.
 14. Lagunova Yu.A., Brusova O.M. Influence on the structure of coefficient of readiness to repair cycle of crushing equipment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2012, no. S1-1, pp. 102–107. In Rus.
 15. GOST 27.002-2015. *Nadezhnost v tekhnike (SSNT). Terminy i opredeleniya* [State Standard 27.002-2015. Reliability in technology. Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 39 p.
 16. *Stoylenskiy GOK i UZTM otkryli novuyu epokhu v segmente drobleniya rudy* [Stoilensky Mining and Beneficiation Plant and Uralmashplant ushered in a new era in the ore crushing segment]. Available at: [https://uralmash-kartex.ru/stoilenskij-gok-i-uztm-](https://uralmash-kartex.ru/stoilenskij-gok-i-uztm-otkryli-novuyu-epoxu-v-segmente-drobleniya-rudy)
 17. Zhuravlev A.G., Chendyrev M.A., Cherepanov V.A., Glebov I.A. Methodical approach to the development of regulations of maintenance and repair of crushing equipment of mining companies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2020, no. 3-1, pp. 543–556. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-543-556.
 18. Andreeva L.I., Krasnikova T.I., Ushakov Yu.Yu. The methodology for the formation of an effective system to ensure the performance of mining equipment. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2019, no. 5, pp. 92–106. In Rus. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-92-106.
 19. Andreeva L.I. Assessment of efficiency improvement potentiality in ore pretreatment at Kovdor Mining and Processing Plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2019, no. 1, pp. 185–192. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-185-192.
 20. Zhuravlev A.G., Chentsov P.A. Possibilities of automated optimization of the operation of quarry transport systems based on a multi-agent approach. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2019, no. S11, pp. 141–150. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-141-150.
 21. Lagunova Yu.A., Furin V.O., Fedulov K.A. Konusnye drobilki PAO «Uralmashzavod» dlya konkretnykh usloviy ekspluatatsii [Cone crushers of PJSC «Uralmashzavod» for specific operating conditions]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2018, no. 1 (135), pp. 27–33.

Received: 22 October 2020.

Information about the authors

Artem G. Zhuravlev, Cand. Sc., assistant professor, laboratory chief, Institute of Mining of Ural branch of RAS.

Vladimir A. Cherepanov, researcher, head of the nondestructive testing laboratory, Institute of Mining of Ural branch of RAS.

MINING AND TOURISM: IS IT POSSIBLE TO SUSTAIN RESOURCE-DRIVEN REGION?

Liliya G. Kiriyanova,
kiriyanova@tpu.ru

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

Dependence of regional economy on resource-driven path is one of methodological and regional policy challenges. It is crucial to understand how to stimulate new paths creation in locked-in resource-driven regions. This paper highlights that new path can appear not only in diversified regional economy by intercrossing innovations or by branching process to related technological spheres. It is shown that technological and infrastructure connectivity is not the only possible way for old industries to create a new one. Mining and tourism are often debated as sectors with conflict interests which never can co-exist in one region. In this article we offer the model to explain stages, interplay between main agents of changes, mechanisms and regional assets in the emergence of the tourism industry in mining region in Western Siberia, Russia. The key findings reveal synergy of mining and tourism in region sustainability. It is demonstrated that financial resources, human resources, networks, access to external resources, lobbying resources of the «coal» path can serve critical inputs to create a «tourism» one. Economic interests and resources of private actors mainstreamed and supported by strategic interests of the public policy may create a new path. Model of unrelated diversification provides long-term sustainable development of the region and can be used in other Russian regions.

Key words:

Resource-dependent regions, regional economy diversification, mining, tourism, path dependence.

Introduction

The leading specialists in spatial economy provoked huge debates on how and why history matters for growth, decline and development of the regional economy [1–4]. Evolutionary economic geography supposes that the economic space is socially constructed and influenced by path and place-dependent processes. The economy is an irreversible historical process, in which future outcomes depend on past events and impacts: at any point in time, the state of the economy depends on the historical adjustment of thus taken path [5]. Evolutionary economic geography focuses on the examination of courses, forces and trajectories of spatial economy transformations over time [2, 6]. The current distribution of economic activity across space is understood as an outcome of largely contingent, path dependent, historical processes [1, 7].

The path dependence of different territories has its own specific historical courses and forces but prevailing sources can be found in rich natural resources, recreational attractions, regional technological lock-in, political elite balance, specific capital-intensive infrastructure and others.

Obviously, the path dependence does not imply that the regional economy does not have any chance for alternative development overtime. Indeed, the analyses of path dependence by itself do not give us the understanding about how and why new paths emerge, and this becomes the main theoretical gap.

«Question of how new regional growth paths emerge has repeatedly been raised ... as one of the most intriguing and challenging issues in our field» [3. P. 240]. The path dependence literature still lacks discussions on path creation: how new paths emerge, how new paths are selected, how old paths influence the new ones, what the main factors of path creation success are and others.

This article aims to analyze how absolutely new regional path can appear at the resource-based economy

region. We try to demonstrate that economic, social and geographical background not only determines the dominant path but also affects the development of particular alternatives. Model of path creation will be revealed and demonstrated as in the case of Sheregesh Ski resort, Kemerovo region, Russia.

Novelty

By presenting the case of a new path creation in the resource-based region of Western Siberia this article aims at generating more answers to still unsolved questions of path creation.

First. Why and how do the actors of an «old» path initiate and create a new one? It will be shown that technological and infrastructure connectivity is not the only possible way for old industries to create a new one. Unrelated diversification can provide long-term sustainable development of the region [7]. The case of Sheregesh area in Kemerovo region will demonstrate how a coal-based industry supports the transformation of the territory towards successful ski resort. It will be demonstrated that economic interests and resources of private actors mainstreamed and supported by strategic interests of the public policy may create a new path. Financial resources, human resources (mainly management), networks, access to external resources, lobbying resources of the «old» path can serve critical inputs to create a new one, even if these two paths do not have any technological connectivity.

Second. Can emerging industries in peripheral regions be influenced by extraregional knowledge and experience [8]? It will be demonstrated how the knowledge on tourism development in central Russian regions is anchoring in peripheral Sheregesh. Anchoring is not simply about bringing external knowledge to the region, but about «re-contextualizing and diffusing it in place, supported by capable entrepreneurs, universities, new organizations, policy action and flexible institutional settings» [9].

Third. Can different paths co-exist within one region, especially when they are not technologically interconnected or complimentary and even conflicted? The tourism and resource-based industries have a long obvious history of conflict, often forcing out and replacing each other in regions undergoing transition [10–13]. The Sheregesh case is demonstrating that these two industries can not only co-exist but also be two essential parts of the region's sustainable development.

Fourth. There is a need to study how tourism development is directly introduced to regions, which were previously reliant on different sectors, e. g., resource-based economies in peripheral regions [14]. The given case will demonstrate how tourism becomes a new «pole of growth» for a traditional resource-based region and not just a negligible sector.

Fifth. This article focuses on a peripheral region, which lacks market-led adaptive capacity and key assets to create a new path. Especially this problem is current for countries with limited experience in market self-organization, such as Russia. The peripheral regions still lack sufficient studies on «how regions diversify into new growth paths, and to what extent public policy may affect this process» [15]. The case will show the importance of the multiple roles of the state, regional and local policy agents in mediating the creation of new paths.

The study of mining regions is a vital task. It is also critical to define the role of the state and municipal authorities, as well as private businesses for the benefit of scientific and practical application. The study is mainly based on expert interviews of people who made a considerable contribution to the creation and development of the Sheregesh Ski Resort: heads of local authorities at the time of the resort development, heads and workers of key industrial actors, heads of core-business departments of the Kemerovo Region Administration, heads and management of modern hotels, ski slopes and ski lifts.

Materials and methods

We offer the model (Fig. 1) to explain stages, interplay between main agents of changes, mechanisms and regional assets in the emergence of the tourism industry in coal-based region in Western Siberia, Russia.

We use a qualitative method to gain in-depth insights into the role of old path actors in new path initiation and development and how new path can be supported after their initial emergence. Combination of different methods and sources gave opportunity to provide comprehensive view on ski tourism appearance in resource-based Kemerovo region. The research involved 15 in-depth interviews with key actors, past and present, representing Sheregesh local authorities, Kemerovo region authorities, destination management organization, coal companies, tourists companies to create map of actors motivation, resources and interplay at different stages. The fact analyses were supported by the examination of historical secondary data (e. g., strategy documents, local and national government reports, and media articles).

Regional preconditions.

Coal sources of regional path dependence

Following R. Martin and P. Sunley [5] model there are three sources of Kuzbass regional path – natural based

resources; sunk costs of local assets and infrastructures; corresponding region-specific institutions, social forms and cultural traditions (the last two are results of the first one).

Kemerovo region located in Western Siberia was founded in 1943 as an urgent need to create a new center of coal, chemical and metallurgical industry for the Soviet Union. Natural resources (iron, copper, manganese and polymetallic ores, phosphorites and aluminum raw materials, dolomite and quartzite) made the region critical for the development of a large-scale industry. The biggest coalfield on the planet is located here. Its reserves are estimated from 725 to 733 billion tons. The coked coal reserves account for more than 73 % of the total value of coal reserves in Russia, and for the entire group of particularly valuable rocks they make 100 %. In the Soviet era, it laid the basis for the urbanized economy where all cities (currently there are 22 city settlements in the region) and urban-type settlements were bound to mines, metallurgical, chemical and machine-building enterprises. As a result, the external and internal image of the region became so much industrialized that the term Kuzbass (The Kuznetsk Coal Basin) became the second official name of the region.

Coal and metallurgy sectors are dominating in the industrial production, with 72 % of the total share of consumable goods and 52 % of the total number of people employed in the industry of the region. The coal industry plays a crucial role in the economy of the region. A powerful energy complex of the region and energy-intensive production of non-ferrous metallurgy (aluminum, and in the past, zinc), provided a framework for many enterprises to be established in the chemical and other industries. The coal industry and ferrous metallurgy determined the focus of the Kuzbass engineering industry on the production of coal mining, mineral processing and metallurgical machines and mechanisms, as well as car building [16].

In the Soviet economy, all large enterprises used to assume significant social functions and actually provided their employees and their families with the entire social infrastructure including kindergartens, health resorts, cultural institutions, hospitals, etc. Given the dominant position of the coal industry in the region, the social and engineering infrastructure almost completely relied on the production sector. Mining was the main social and cultural dominant of the region, thereby determining its economic, social and even political status.

Key sectors of the economy and social life of the region greatly benefit from the coal industry, thus fostering its successful development and exploiting the raw materials and resources of the latter.

Kuzbass experienced all negative consequences of the Soviet crisis and disintegration of its industrial economy in the 1980–1990s of the XX century. Mines and plants of the region were massively closed, and the adjacent cities and settlements ceased an opportunity for steady social and economic development. After its recovery in 1988 – 159 million tons, in 1989–1990 coal mining in the Kuzbass Basin failed to exceed 150 million tons, and in 1997 it made 94 million tons. This situation was typical for the entire coal industry of the country. Today the

number of people employed in the coal industry is ten times less in comparison with the Soviet period. Neither industry of the former USSR has ever faced such a rapid

drop of the working population. This was the period when the region began to search for economic alternatives and opportunities.

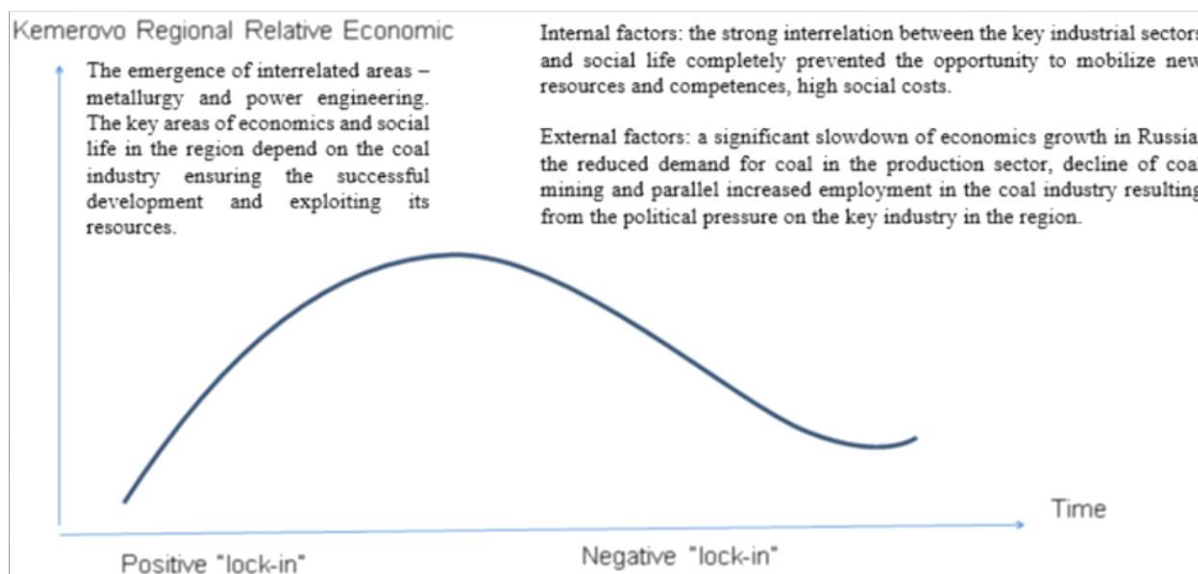


Fig. 1. From «positive» to «negative» «lock-in» in Kemerovo regional path-dependent economic development. Based on Martin and Sunley [5]

Рис. 1. От «позитивной» к «негативной» привязке региональной экономики Кемеровской области [5]

New path initiation and preconditions for tourism choice

In search for alternatives to escape from this negative situation, a number of territories started spontaneously develop their new economic infrastructure thus forming the basis for post-industrial economy in the industrial region. Tourism was considered as one of potential «poles of growth». Kemerovo region was not an exception of this kind. It is noteworthy that it is the only region in Russia having three types of mountain systems (lowlands – Salair Ridge, middle mountains – Gornaya Shoria, highlands – Kuznetsk Alatau). Variety of mountains, long and sunny winter and seasonal snow cover make these mountains attractive for ski tourism. Despite a large number of tourism resources, the region had to develop tourism attractions almost from scratch.

However, it should be noted that at the beginning the society considered the idea of developing tourism in Kuzbass as utopia, and the population was never supporting it. In the industrial region, the problem was not only to overcome the external image of the region, but also to reduce the negative perception of tourism as a professional field among the Kuzbass population. Geographical factors also made a negative contribution to this situation. Kemerovo region is located in Western Siberia at the equidistance from western and eastern frontiers of the Russian Federation. Being in the middle between Moscow and Vladivostok the region is difficult to reach for external tourists. Large cities of the neighboring regions can easily form a sound base for internal tourism, but the geography also complicates the situation.

The Soviet history of Gornaya Shoria area similar to the history of the entire Kemerovo region, is closely linked to mining industry. The only difference of Gorna-

ya Shoria from the majority of regions and cities of Kemerovo region is its economic profile. Iron ore and gold extraction, wood production are those branches of industry which fostered the development of the region's economy. Main towns – Tashtagol and Sheregesh – were founded as industrial centres in the Soviet past.

Another distinctive feature of Gornaya Shoria is the community of Turkic-speaking ethnic minorities called the Shors in the Soviet ethnography. The resettlement of the Shors across the entire territory slightly limited the development of industrial economy since it complicated the resettlement of population necessary for its development. The attempts to attract the Shors to the industry were not successful.

The history of the Sheregesh Ski Resort formally dates back to the late 1970s when two ski tracks and two lines of T-bar lifts were made for the Spartakiad of the Peoples of the USSR in 1981. Since the whole insufficient infrastructure was considered the base exactly for sports competitions, Sheregesh failed to become the mass-tourism zone in the USSR.

Natural resources made Sheregesh the ideal place for the development of alpine skiing and tourism, but four main conditions to foster alternative path development in Sheregesh appeared only in the early 1990s. First, in 1990 the iron ore and gold extraction, wood production, so typical for Sheregesh, found themselves in crisis. Second, economic crisis fostered interactions between main actors of change. The local authorities were eager to improve the social and economic situation, the population tried to find new sources of income, and the developing private businesses were seeking efficient opportunities for development. Third, the long winter snow season in 1989–90

beginning in October–November and ending in April–May (6–7.5 months), brought up the issue of cost-effective development of any kind of winter tourism. The thickness of a snow cover reaches 2 meters and above. Natural soft snow, called «pukhlyak» with specific «cold» structure, which is particularly popular among alpine skiers, especially free riders, later gained its full recognition after being compared with similar resorts of Russia and the West. The mountains had comfortable slopes and tracks suitable for both the beginners and experienced alpine skiers. Fourth, the USSR perestroika shifted the attention to environmental issues and problems of ethnic minorities. In the forefront of politicization and actualization of these issues, at the end of 1989 the regional authorities decided to establish a national natural park in the territory of Gornaya Shoria mountains. As a result, since the end of the 1980s there was a need to coordinate the tourism policy with environmental and national policy of Gornaya Shoria. Thus, the involvement of state institutions into the development of tourist infrastructure in Gornaya Shoria became inevitable.

«Tourism» path creation – local authorities
and mining business initiatives and cooperation

The Shoria-Tur, a tourist and sports joint-stock open company, which main objective was to develop recreation tourism in Gornaya Shoria mountains, was founded in October 1990 upon the initiative of the local authorities. Additional funds of regional and city budgets, municipalities of certain regional cities, investments from banks and industrial giants of Kuzbass were raised to implement the program. The industrial giants being in the most difficult situation looked for every opportunity for further existence. One of the ways out was tourism investments (mainly as products and goods received through barter (TVs, video recorders, materials, etc.)).

The Sheregesh village was experiencing a huge problem related to its infrastructure. There was not even straight road to main cities of the region. Consequently, the railroads were the only real and sufficient means of transport. For this reason, the first project of the Shoria-Tur was the construction of the railway dead end station for trains, which arrived from the biggest nearest cities – Novokuznetsk, Novosibirsk and Kemerovo. The management of the Shoria-Tur came forward with an initiative to build the ski resort directly connected to railway transport.

In 1992, the former summer camp near the railway station was given by one of the ore plants to the Shoria-Tur. The Shoria-Tur built the first ski slope and installed the T-bar lifts. Being the railway dead end, the Tourist railway station consisting of three railway tracks and stations were built in cooperation with the Russian Railway.

In 1995 the tracks of the Mount Zelyonaya were exposed to homologation, which resulted in FIS certificate (International Ski Federation) making it possible to hold competitions of the international level and the European cup standard. This provoked the discussions with the Russian Alpine Ski and Snowboard Federation on the Russian alpine skiing championship in Sheregesh. «Everyone that was among the originators of Sheregesh was

either a professional mountain skier or an enthusiast of this business. They studied all slopes on foot. The very first tracks, later used for Russian alpine skiing championships, are still the best. They have the best relief and the longest season» (from interview).

«Tourism» path development.

Local initiative becoming regional strategy

Despite all difficulties in tourism, the Shoria-Tur and local authorities initiated the construction of complex ski resort and initiated the tourism strategy. In 1996 the regional program was developed. The regional administration made it possible for some initiatives within this program to be included into the federal target program on the Development of Tourism in the Russian Federation. The total funding for 1996–1997 made 5.4 billion rubles of the total federal budget.

In 1996–1999, the Russian alpine skiing championships were held in Gornaya Shoria. It was another risky initiative of the Shoria-Tur, which could ensure serious information, image and administrative dividends. This decision of the Russian Alpine Ski and Snowboard Federation attracted the attention of alpine ski athletes and tourists to Sheregesh. The following three championships marked high level of Sheregesh alpine ski resort and increased the number of its potential tourists. The Shoria-Tur started intensively attracting tourists. From 1998 to 2001, the flow of tourists increased from 7000 people to 32000 during a season.

In 1997 new governor of Kemerovo region and his management team was actively involved into the construction of the ski resort. The new development program of the Sheregesh Ski Resort was implemented against the guarantees of the new governor. The new management team officially highlighted the need to diversify the region's economy. Tourism was recognized as a potential growing point of the regional economy. In spite of the success of one local authority, the development of tourism in the industrial region was considered a nonsense, but the team of the new regional governor supported the local initiative. The administrative shift towards the understanding of the region's growth points was obvious.

Active promotion of Sheregesh and increase in the number of tourists led to higher investments. «For example, Kuzbass Metallurgical Complex having no available funds to invest into the project, gave metal at the request of the Shoria-Tur. It was sold to Kazakhstan, and for the income gained a second-hand and therefore cheap lifts were bought» (from interview).

Lack of financial resources in the region resulted in the situation when new modern hotel owners were constantly changing throughout the construction.

At the same time, it should be noted that until 2003 the resort developed spontaneously although quite dynamically. Unfortunately, such spontaneity resulted in disordered construction of the mountain bottom facilities, which up to now, causes claims with regard to its consistency and comfort for tourists. Today the mountain has several dozens of owners not legally bound to each other, and hence at times it is rather difficult to solve the issues of resort development, its improvement and promotion.

In 2001 the new development concept of the Sheregesh resort was developed, which implied the attraction of leading Russian experts. During that period, the resort potential was estimated to accommodate 50000 tourists a year.

In the early 2000s, the Shoria-Tur was passing through many hardships. It was a standard situation – change of owners. Initially regional and municipal authorities were one of the main shareholders of the Shoria-Tur. As the legislation was amended, all governing bodies, both regional and municipal ones, were not allowed possessing any property. For a while, the EVRAZ Company (large metallurgical and mining company) became the owner of the business. However, due to economic changes it began to divest assets that did not belong to the main business, which at that time was tourism. The company could not afford such property. Tourism by itself did not bring huge profit to be able to reinvest in its development. The first strategic development agency of Sheregesh and main actor of change disappeared.

Throughout 15 years, Sheregesh turned into the alpine ski resort with well-developed infrastructure and a large number of owners. 120000 people visited Sheregesh in 2006. On average, every year the tourist flow was increasing by 20000 persons.

By 2006, over 50 companies invested approximately 1,2 billion rubles to the development of the Sheregesh resort. All these led to new opportunities for tourism and business. Several coal mining companies registered the Fund for Supporting Winter Sports. Over 33 million rubles were invested into the infrastructure of a new section of the Sheregesh resort. The total intended investments to this project made \$100 million.

Federal status and mining investors

In the fall of 2006, the administration of Kemerovo region submitted an application to the Federal Agency for Management of Special Economic Zones of the Ministry for Economic Development and Trade to participate in a competition on establishing the tourism and recreation special economic zone in the south of Kuzbass, specifically in Sheregesh. The scope of the project covered the construction of a modern ski resort during 3,5 years. The expected project investments were estimated as 15 billion 700 million rubles, 8 billion of which should be invested by coal companies of Kuzbass and 2,5 billion should be allocated from federal and regional budgets. It was planned to attract the remaining sum through the federal target programs. This also implied that the residents of such zones would get certain tax benefits. Unfortunately, when the project was initially reviewed in Moscow, it failed to receive the declared status. However, despite this failure, neither investors nor the regional and district authorities dropped the idea of development. In 2009 over 300000 Russian and foreign tourists visited the resort.

In 2010, the application of the local authorities to award Gornaya Shoria the status of the tourism and recreation special economic zone was supported. The total area of this zone made 1,981 hectares. It was planned to attract private investments and create additional jobs for further and sustainable development of Sheregesh. The

strategy was aimed at comprehensive year-round functioning of the resort. The total construction cost of the Sheregesh resort makes 15,7 billion rubles, while half of this sum comes from private investors with the biggest share from coal and mining companies.

In 2012, the regional authorities set a new challenge to Sheregesh, i. e. to welcome up to one million tourists a year. To achieve this, a new development concept was designed. It was intended to transfer some federal lands into municipal property and therefore create five skiing sectors. The second challenging task was to create the general development strategy. The distinctive feature of Sheregesh was that almost all its facilities had their owners. This causes difficulties in creating the general development strategy of the resort, including management of economic and municipal issues and promotion of the resort worldwide. The owners only began to unite their efforts in the last two–three years, which were difficult for the resort. Abnormally dry and hard winter, frozen water intakes, and problems with power supply led to sharp and continuous decrease in sales volumes. The owners realized that the only possible way to survive is to unite efforts [17].

According to the ranking of the Booking.com, in 2014/2015 season the Kuzbass Sheregesh became the most popular in Russia. The flow of tourists to Sheregesh Ski Resort reached 960000 tourists during a season.

In 2014, the regional project Sheregesh Tourist and Recreation Cluster took the highest place in the ranking of the federal program Development of Domestic and Inbound Tourism in the Russian Federation (2011–2018).

The designed master plan of the resort was adjusted to western (mainly Canadian) experience to overcome problems of chaotic development and seasonality of the resort. Thus, this fostered the global objective to promote the transformation of the Sheregesh resort into the world-class year-round resort. The experts made the digital topographical survey, which for the first time allowed carrying out the global analysis of slopes taking into account certain factors, including, land topography, illumination, etc.

The development of the Sheregesh resort is a vivid example of creating a modern ski resort within a short time and under adversity. In view of the above difficulties the result achieved by the region in terms of its tourism development looks rather impressive. High dynamics is reflected in the mere statistics. In 2000, over 150000 people had their holidays in Kemerovo region, while in 2018 this figure made over 1 million 500 thousand people.

Results

New path creation – what is the problem

The original economic theories on path dependence were strongly related to the idea that changes in dominant technological and economic paths can be raised only by an exogenous (external) shock [18, 19]. Once historical selections of technological, social and other practices have become stable, it is not possible to escape from a formed path unless an external shock creates a new path [1, 5, 20].

Recent evolutionary studies have challenged the traditional model of path dependence and its focus on exogenous shocks, historical chance and accidents as a source of new path creation. The main arguments are that new regional paths «do not start from scratch but are strongly rooted in the historical economic structure of a region» [3. P. 261]. Pre-existing regional context plays the central role in path creation and development or neglecting stressed that new path development is shaped by «preexisting resources, competences, skills and experiences that have been inherited from previous local paths and patterns of economic development» [8. P. 115].

Most of the evolutionary studies on path creation are focused on technological aspects and new industries [21–25]. The main mechanisms of new industry development can be found in technological connectivity and interdependence of regional industries, territorial and sectoral knowledge dynamics, and branching processes [1, 7, 9, 21–29]. Scholars stress that in the majority of cases new paths are created in technologically related fields where preexisting industrial structures (as well as logistics, supply chains, regional brand, etc.) predetermine possible ways [23, 29, 30]. It is some kind of socio-economic isomorphism. This approach and corresponding empirical studies can be found in the growing number of EEG literature [8, 22, 31]. Martin and Sunley [5] claim that the transition of declining industries into new technologically related sectors of growth show that path creation is an inherent latent part of any ongoing processes of path dependence. However, does it mean that new paths cannot appear at all; that even by creating new paths the local economies are locked-in by current technologies moving towards technological connectivity? The process, through which actors of a new path use and transform generic resources of the region to new industries completely different from existing trajectories, is not conceptualized in detail in research literature.

Path creation as network activities of different actors

Current evolutionary scholars consider path creation as the most complex process than just a series of accidents or technological shift and diversification to close related fields. New path creation is a complex interactive process when different distributed actors exchange knowledge, integrate resources and jointly construct new markets, form new regional products, create new regulations, attract investments and as a result foster conducive environment for new industry development [7, 31]. At least three dimensions can be identified within this constructive process: actors, networks, and institutions [7–9, 22, 32].

There can be a broad range of different actors involved in the path creation process: public bodies (national authorities, local governments, special economic zones, etc.), companies (including start-ups and spin-offs) operating in the region, universities, associations, external investors, as well as local citizens. Formal and informal networks are important since they provide an opportunity for knowledge exchange and create the basis for resource allocation. It includes associations, clusters, unions, etc. Formal and informal rules, laws, cultures and routines

that define actors' behavior form institutional contexts. The six key processes (knowledge creation, entrepreneurial experimentation, market formation, resource mobilization, creation of legitimacy, guidance of the search) can be interpreted as aggregates of the distributed agency in an emerging technological field, thus forming distinct resources for the actors involved in a new path as well as for the future evolution of the industry as a whole [21].

Who rules?

How and why do heterogeneous actors start acting jointly upon locked-in structures and mobilizing resources to create a new industry? As R. Garud and P. Karnøe [33, 34] have argued, any theory of path creation should attach a prominent role to the importance of some strategic agency and the deliberate, «mindful deviation» of entrepreneurs from established paths. Entrepreneurial activity towards new paths creation is not a random act. That is, entrepreneurs are always attempting to release from structures that they are embedded into while reusing some of the rules and resources [33]. What is this strategic agency that rules new path creation? Is it a task-oriented public policy body or self-organized private actor? Current researches focused on technological shifts of regional firms and their entrepreneurial activities underestimate the influence of nonfirm actors, institutions, and public policy in creating new paths in the region [21, 23, 35, 36].

Conclusions

As we can see from Sheregesh case there are three main factors for new path creation in mining region. Firstly, old «coal» path has to be in crisis and this crisis has to be recognized by main stakeholders – key industry and authorities. Necessity to save investments is the strongest motivation to search for alternatives for the core regional business, even if this business is resource-based. Secondly, there have to be some society visible actors (local authorities, NGO) who distinctly offer new alternative. The idea can be borrowed (external knowledge transfer) and re-contextualized in local conditions. Thirdly, only interplay and collaboration of three main key actors – industry (as investor and management competences provider), authorities (for public articulation, process mediation and regulations support) and social institutions (as experts, external knowledge interpreters) can provoke new path creation.

The main empirical and methodological findings summarized in Fig. 2.

This paper has highlighted that new path can appear not only in diversified regional economy by intercrossing innovations or by branching process to related technological spheres. The case of Sheregesh resort in Kemerovo region demonstrates that economic interests and resources of private actors mainstreamed and supported by strategic interests of the public policy may create a new path which is not technologically interconnected or complimentary with the old one. Moreover, financial resources, human resources (mainly management), networks, access to external resources, lobbying resources of the «old» path can serve critical inputs to create a new one, even if these two

15. Asheim B.T., Boschma R., Cooke P. Constructing regional advantage: platform policies based on related variety and differentiated knowledge. *Regional Studies*, 2011, vol. 45, Iss. 7, pp. 893–904.
16. Riabov V., Stolbova O. Modern industrial complex of Kemerovo region. *Vestnik Kemerovskogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 41–46. In Rus. DOI: 10.21603/2542-2448-2017-3-41-46.
17. Valtseva A., Ailarova N. Tourist business in Sheregesh began with houses, which remained from builders. *RATA news. Daily electronic newspaper of the Russian Tourism Union*, 2012, no. 3183. Available at: http://www.ratanews.ru/news/news_3122012_2.stm (accessed 12 October 2020).
18. David P.A. *Clio and the economics of QWERTY*. *American Economic Review*, 1985, no. 75, pp. 332–337.
19. David P.A. Path dependence in economic processes: implications for policy analysis in dynamical systems contexts. *The evolutionary foundations of economics*. Ed. by K. Dopfer. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. pp. 151–194.
20. Henning M., Stam E., Wenting R. Path dependence research in regional economic development: cacophony or knowledge accumulation? *Regional Studies*, 2013, vol. 47, no. 8, pp. 1348–1362. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00343404.2012.750422> (accessed 12 October 2020).
21. Binz C., Truffer B., Coenen L. Path creation as a process of resource alignment and anchoring: industry formation for on-site water recycling in Beijing. *Economic Geography*, 2016, vol. 92, no. 2, pp. 172–200. DOI: 10.1080/00130095.2015.1103177.
22. Carvalho L., Vale M. Biotech by bricolage? Agency, institutional relatedness and new path development in peripheral regions. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2018, vol. 11, pp. 275–295. DOI: 10.1093/cjres/rsy009
23. Dawley S., MacKinnon D., Cumbers A., Pike A. Policy activism and regional path creation: the promotion of offshore wind in North East England and Scotland. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 2015, vol. 8 (2), pp. 257–272. DOI: 10.1093/cjres/rsu036.
24. Feldman M.P., Lendel I. The emerging industry puzzle. Optics unplugged. Beyond Territory. *Dynamic geographies of knowledge creation, diffusion, and innovation*. Eds. H. Bathelt, M.P. Feldman, D.F. Kogler. London, Routledge, 2011. pp. 107–148.
25. Miörner J., Trippel M. Paving the way for new regional industrial paths: actors and modes of change in Scania's Games Industry. *European Planning Studies*, 2017, vol. 25, no. 3, pp. 481–497. DOI: 10.1080/09654313.2016.1212815.
26. Bresnahan T., Gambardella A., Saxenian A. Old economy' inputs for 'new economy' outcomes: cluster formation in the New Silicon Valleys. *Clusters, networks and innovation*. Eds. S. Breschi, F. Malerba. Oxford, Oxford University Press, 2005. pp. 113–135.
27. Crevoisier O., Jeannerat H. Territorial knowledge dynamics: from the proximity paradigm to multi-location milieus. *European Planning Studies*, 2009, no. 17, pp. 1223–1241.
28. Karnøe P., Garud R. Path creation: co-creation of heterogeneous resources in the emergence of the Danish Wind Turbine Cluster. *European Planning Studies*, 2012, no. 20, pp. 733–752.
29. Martin R. (Re)placing path dependence: a response to the debate. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2012, no. 36, pp. 179–192.
30. Isaksen A., Trippel M. Exogenously led and policy-supported new path development in peripheral regions: analytical and synthetic routes. *Economic Geography*, 2017, vol. 93, no. 5, pp. 436–457. DOI: 10.1080/00130095.2016.1154443.
31. MacKinnon D., Dawley S., Pike A., Cumbers A. Rethinking path creation: a geographical political economy approach. *Economic Geography*, 2019, vol. 95:2, pp. 113–135. DOI: 10.1080/00130095.2018.1498294
32. Musiolik J., Markard J., Hekkert M. Networks and network resources in technological innovation systems: towards a conceptual framework for system building. *Technological Forecasting and Social Change*, 2012, no. 79, pp. 1032–1048.
33. Garud R., Kumaraswamy A., Karnøe P. Path dependence or path creation? *Journal of Management Studies*, 2010, no. 47, pp. 760–774.
34. Garud R., Karnøe P. Path creation as a process of mindful deviation. *Path Dependence and Creation*. Eds. R. Garud, P. Karnøe. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2001. pp. 1–39.
35. Hassink R., Klaerding C., Marques P. Advancing evolutionary economic geography by engaged pluralism. *Regional Studies*, 2014, no. 48, pp. 1295–1307.
36. Andrades L., Dimanche F. Destination competitiveness and tourism development in Russia: issues and challenges. *Tourism Management*, 2017, vol. 62, no. C, pp. 360–376.

Received: 22 October 2020.

Information about the authors

Liliya G. Kiriyanova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 332

УГОЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ТУРИЗМ: МОЖНО ЛИ ДОБИТЬСЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТРАДИЦИОННОЙ СЫРЬЕВОЙ ТЕРРИТОРИИ?

Кириянова Лилия Геннадьевна,
kiriyanova@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Зависимость региональной экономики от добывающей промышленности – один из методологических и управленческих вызовов. Важно понять, как стимулировать появление новых социально-экономических траекторий и сформировать устойчивость сырьевого региона. В статье показывается, что новые траектории развития могут формироваться не только в диверсифицированной региональной экономике на основе смежных инноваций и «ответвлений» в технологически связанные отрасли. Технологическая связанность – не единственный способ для «старой» сырьевой экономики развить новое направление. Угольная промышленность и туризм часто рассматриваются как взаимоисключающие фокусы экономики, которые не могут сосуществовать в одном регионе. В этой статье мы покажем успешную модель появления туристической отрасли в традиционном угольном регионе, учитывающую стадии, механизмы, ресурсы и взаимодействие основных агентов изменений. В статье демонстрируется, что финансовые ресурсы, человеческий капитал, инфраструктура, сети, доступ к внешним ресурсам и лоббистский потенциал угольной промышленности могут стать критической основой для формирования туристической отрасли в регионе. Экономические интересы и ресурсы частных акторов, поддержанные стратегическими интересами государственной и местной политики, могут сформировать новую отрасль, технологически не связанную со «старой». Угольная промышленность и туризм могут формировать синергетический эффект и совместно обеспечивать устойчивое развитие территории. Модель несвязанной диверсификации создает условия для долгосрочного устойчивого развития и может быть использована в других российских сырьевых регионах.

Ключевые слова:

Сырьевые регионы, региональная диверсификация, угольная промышленность, туризм, теория колеи.

Информация об авторах

Кириянова Л.Г., кандидат философских наук, доцент Школы инженерного предпринимательства, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура 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 28.11.2020. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,24. Уч.-изд. л. 22,83.
Заказ 163-20. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ