

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 331, № 10, 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)  
Кирыанова 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 геоактивов.

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 331, № 10, 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)  
Belozerv V.B., Dr. Sc. (Russia)  
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., PhD (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)  
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
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](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).



## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Регулирование воспроизводимости параметров полимерных резисторов при повышенных температурах**  
Минакова Н.Н., Ушаков В.Я.
- Районирование инженерно-геокриологических условий трассы трубопровода на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении**  
Строкова Л.А., Галеева Э.И.
- Ртуть в ряске как индикатор техногенеза на территории России**  
Барановская Н.В., Барановская А.Ю., Капитонова О.А.
- Эффективность комбинирования технологий выемки руд в пределах рудного поля**  
Голик В.И., Лукьянов В.Г., Качурин Н.М., Стась Г.В.
- Влияние сил сопротивления на глубину резания–скалывания горной породы алмазным резцом**  
Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю.
- Методика анализа экосистемного разнообразия ландшафтов региона по материалам дистанционного зондирования**  
Осипов А.Г., Дмитриев В.В., Ковязин В.Ф.
- Экологическое состояние почв промышленных территорий (на примере г. Березники, Пермский край): сравнение отечественных и зарубежных методов оценки**  
Ушакова Е.С., Караваева Т.И., Белкин П.А.
- Обоснование регламента проходки параллельных взаимовлияющих выработок в напряженных трещиноватых скальных массивах**  
Харисов Т.Ф., Балец А.Е., Озорнин И.Л.
- Оценка эффективности циклично-поточной технологии в условиях современных карьеров**  
Журавлев А. Г., Семенкин А.В.
- Комплексный подход к применению методов анализа эффективности системы заводнения нефтяных пластов**  
Полякова Н.И., Максимова Ю.А., Зятиков П.Н.
- Применение потокоотклоняющих герметизирующих шаров BioBalls при проведении многостадийного гидроразрыва пласта**  
Терпинская В.В., Абрамов П.А., Карпова Е.Г.
- Исследование фильтрационных характеристик и эффективности вытеснения нефти при заводнении морского месторождения с тяжелой нефтью**  
Се Кун, Мэй Цзе, Нажису, Ерофеев В.И., Су Ченг, Цзян Вэйдун, Лу Сянго
- Условия формирования песчаных пластов-коллекторов Яковлевской свиты на территории лодочного нефтегазоконденсатного месторождения**  
Черданцева Д.А., Кравченко Г.Г., Краснощекова Л.А.
- Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования**  
Хабибуллин М.Я.
- Анализ тригонометрических составляющих временных рядов данных мониторинга окружающей среды**  
Устинова И.Г., Бондаренко С.Л., Рожкова О.В.
- Выделение лития на сорбентах Токем-160 и Amberlite IR-120 из водных растворов**  
Попов Г.В.
- Методика управления риском проявления оползневых процессов с учетом фактора сейсмической активности на территории Киргизской республики**  
Романенко С.В., Ларионова Е.В., Малдыбаев У.А., Айдаралиев Б.Р., Ордобаев Б.С.
- 7 Regulation of reproduction of polymer resistor parameters at increased temperatures**  
Minakova N.N., Ushakov V.Ya.
- 14 Zoning of engineering-geocryological conditions of the pipelines on Vostochno-Messoyakhskoe field oil and gas condensate field**  
Strokova L.A., Galeeva E.I.
- 23 Mercury in duckweed as an indicator of technogenesis in Russia**  
Baranovskaya N.V., Baranovskaya A.Yu., Kapitonova O.A.
- 32 Efficiency of combining ore mining technologies within an ore field**  
Golik V.I., Lukyanov V.G., Kachurin N.M., Stas G.V.
- 40 Influence of resistance forces on the depth of rock cutting–chipping by a diamond cutter**  
Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu.
- 49 Methods of analyzing landscape ecosystem diversity of a region based on remote sensing**  
Osipov A.G., Dmitriev V.V., Kovyazin V.F.
- 58 Ecological condition of soils in industrial areas (as in the case of Berezniki, Perm region): comparison of Russian and foreign methods of assessment**  
Ushakova E.S., Karavaeva T.I., Belkin P.A.
- 71 Justification of regulations for driving parallel mutually influencing mine workings in stressed cracked rocky massifs**  
Kharisov T.F., Balek A.E., Ozornin I.L.
- 80 Evaluation of the effectiveness of the cyclic-flow technology in the modern quarries**  
Zhuravlev A.G., Seminkin A.V.
- 91 Integrated approach to application of methods for analyzing the effectiveness of the oil reservoir flooding system**  
Polyakova N.I., Maksimova Yu.A., Zyatikov P.N.
- 99 Application of flow diverting sealing BioBalls during multistage hydraulic fracturing**  
Terpinskaya V.V., Abramov P.A., Karpova E.G.
- 105 Study on seepage characteristics and displacement efficiency of water flooding in offshore heavy oil reservoir**  
Kun Xie, Jie Mei, Narisu, Erofeev V.I., Cheng Su, Weidong Jiang, Xiangguo Lu
- 115 The Yakovlevskaya suite oil-bearing sandstone formation conditions in the Lodochnoe oil field**  
Cherdantseva D.A., Kravchenko G.G., Krasnoshchekova L.A.
- 128 Improvement of hydroxylic acid well processing applying the latest technologies and equipment**  
Khabibullin M.Ya.
- 135 Analysis of trigonometric components of time series of environmental monitoring data**  
Ustinova I.G., Bondarenko S.L., Rozhkova O.V.
- 146 Lithium excreting on sorbents Tokem-160 and Amberlite IR-120 from aqueous solutions**  
Popov G.V.
- 155 Risk management technique of landslides activation with account of seismic activity factor in Kyrgyzstan**  
Romanenko S.V., Larionova E.V., Muldybaev U.A., Aydaraliev B.R., Ordobaev B.S.

- |   |   |
|---|---|
| <p><b>Уточнение геолого-гидродинамической модели<br/>сложнопостроенной залежи нефти путем комплексного<br/>анализа данных</b><br/>                     Козырев Н.Д., Кочнев А.А., Менгалиев А.Г.,<br/>                     Путилов И.С., Кривошеков С.Н.</p>        | <p><b>164 Refinement of the geological and hydrodynamic model<br/>of a complex oil reservoir by means of a comprehensive<br/>data analysis</b><br/>                     Kozyrev N.D., Kochnev A.A., Mengaliev A.G.,<br/>                     Putilov I.S., Krivoshchekov S.N.</p> |
| <p><b>Утилизация балластной попутно добываемой воды<br/>с применением технологии скважинной сепарации<br/>водонефтяных эмульсий</b><br/>                     Лекомцев А.В., Дерендяев К.А.,<br/>                     Бурцев А.С., Степаненко И.Б., Жигарев Д.Б.</p> | <p><b>178 Utilization of ballast water produced along<br/>the way using the technology of well separation<br/>of oil-water emulsions</b><br/>                     Lekomtsev A.V., Derendyaev K.A.,<br/>                     Burtsev A.S., Stepanenko I.B., Zhigarev D.B.</p>      |
| <p><b>Влияние состава водородсодержащего газа<br/>на выход метанола</b><br/>                     Загашвили Ю.В., Кузьмин А.М.</p>   | <p><b>187 Influence of hydrogen-containing gas composition<br/>on methanol yield</b><br/>                     Zagashvili Yu.V., Kuzmin A.M.</p>   |

УДК 620.9:538.9

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРНЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Минакова Наталья Николаевна<sup>1</sup>,  
minakova@asu.ru

Ушаков Василий Яковлевич<sup>2</sup>,  
vyush@tpu.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет,  
Россия, 656049, Барнаул, пр. Ленина, 61.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** работы обусловлена тем, что резистивные полимерные материалы активно применяются в различных электротехнических устройствах. Некоторые из них изготавливаются из наполненных техническим углеродом каучуков по хорошо освоенной промышленной технологии из доступного сырья. Дальнейшее увеличение масштабов их применения сдерживает сложность выбора компонентов для обеспечения требуемых электрофизических свойств. Разброс параметров, связанный с многокомпонентностью структуры, увеличивает стоимость и сырья для изготовления готовых изделий, и технологии.

**Цель:** оценка возможности улучшения воспроизводимости свойств в серии электротехнических изделий для конкретных условий эксплуатации за счет рецептурных приемов. Проблема усугубляется многокомпонентностью структуры, которая затрудняет обеспечение стабильности и воспроизводимости электрофизических свойств. Для обеспечения возможности использования результатов в промышленных технологиях электротехнические изделия и образцы изготавливались из композиционных материалов, которые отличались концентрацией, маркой электропроводящего компонента, видом полимера.

**Методы:** инструментальные измерения электрофизических характеристик резистивных полимерных композиционных материалов, дисперсионный, регрессионный и корреляционный анализы.

**Результаты.** Определены закономерности изменения коэффициента вариации и величины температурного коэффициента сопротивления от концентрации электропроводящего наполнителя (технического углерода), вида каучука при нагреве постоянным и переменным током в диапазоне приложенного напряжения до 1000 В. Разработаны рекомендации по повышению однородности структуры полимерных композиционных материалов в условиях их эксплуатации при повышенных температурах. Их применение способствует сокращению используемых ресурсов (энергии, материалов, времени) благодаря повышению воспроизводимости величины объемного электрического сопротивления при нагреве в процессе эксплуатации электротехнических изделий.

### Ключевые слова:

Ресурсосбережение, наполненные полимеры, объемное электрическое сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, коэффициент вариации, повышенная температура.

### Введение

Резистивные полимерные композиционные материалы применяются для изготовления широкой гаммы электротехнических изделий: резисторов, нагревателей, экранов кабелей, антистатических устройств и др. [1–3]. Для расширения масштабов их применения и улучшения потребительских свойств необходимо создать материалы с заданной величиной объемного электрического сопротивления (ОЭС), что достигается оптимальным подбором вида полимера, марки и концентрации электропроводящего наполнителя. Одновременно требуется решение задачи повышения эффективности использования материалов и изделий из них.

В наполненных полимерах протекает комплекс сложных, трудно контролируемых процессов, приводящих к формированию межфазной поверхности соприкосновения проводящего наполнителя с полимером [4–8]. Из-за многокомпонентности структуры и сложности технологии изготовления, включающей однородное распределение электропроводящего наполнителя в полимерной матрице, величина ОЭС

не может быть рассчитана аналитически и всегда имеет определенной разброс [9, 10]. При его существенной величине затраченные материальные, временные и другие ресурсы используются неэффективно. Для уменьшения такого разброса требуется изучение влияния основных компонентов резистивного полимерного композиционного материала на воспроизводимость эксплуатационных параметров при серийном производстве.

В научных публикациях можно встретить отрывочные сведения о результатах экспериментального определения воспроизводимости свойств резистивных полимерных композиционных материалов. Обычно изучается величина ОЭС в серии изделий после технологического цикла. Экспериментально подтверждено, что воспроизводимость величины ОЭС при серийном производстве снижается при уменьшении концентрации электропроводящего наполнителя из-за сложности его однородного распределения по объёму матрицы [11, 12].

Оценка воспроизводимости величины ОЭС в серии изделий после технологического цикла не позво-

ляет в полной мере оценить эффективность использования ресурсов при заданных требованиях к надежности эксплуатации электротехнических устройств.

Главный эксплуатационный параметр материалов электротехнических устройств в слабых электрических полях – температура. Она определяющим образом влияет на величину ОЭС. Воздействие температуры может существенно повлиять на величину воспроизводимости эксплуатационных параметров в серии, снижая работоспособность электротехнического устройства из-за ухудшения качества материала.

Сведения об исследовании воспроизводимости резистивных полимерных композиционных материалов при нагреве в литературе не обнаружены. Представляло интерес выявить связь разброса электрофизических параметров в серии изделий при действии температуры со свойствами основных компонентов материала.

#### Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выбраны наполненные техническим углеродом каучуки, которые характеризуются доступностью исходных компонентов и высоким уровнем отработанности технологии изготовления [13, 14]. Изучались материалы, отличающиеся видом каучука, концентрацией и маркой технического углерода промышленных марок. Электропроводящий наполнитель – технический углерод различной структурности: от низкоструктурного (П-514) до высокоструктурного электропроводящего (П-366 Э). Концентрация определена как отношение массы электропроводящего наполнителя к массе материала матрицы (массовые части наполнителя на 100 массовых частей каучука). Проанализированы материалы с концентрацией технического углерода от 30 до 80 массовых частей на 100 массовых частей каучука.

Как известно, кристаллические полимеры имеют дальний порядок расположения молекул, а аморфные полимеры – лишь ближний порядок. Структурная организация аморфных полимеров – наличие упорядоченных областей, чередующихся с областями беспорядка, малые размеры упорядоченных участков [5]. Такая полидисперсность приводит к разбросу показателей. В этой связи эксперименты выполнялись с материалами, имеющими в качестве матрицы кристаллический каучук (Butil Rubber, IIR по ASTM), в РФ – БК-2055, и аморфный бутадиен-метилстирольный каучук Styrene Butadiene Rubber (SBR по ASTM), в РФ – СКМС-30АРК. В выбранных объектах исследования материалы матрицы различаются химическим строением, морфологией их надмолекулярной структуры, видом и интенсивностью межмолекулярных связей.

Технология изготовления резистивных полимерных композиционных материалов включала стандартные для шинной и резинотехнической промышленности этапы: смешение, профилирование изделия, вулканизация [10, 11]. Дополнительно выполнялось разделение заготовки на изделия необходимых размеров, нанесение электродов на изделия. Образцы для испытаний вулканизировались в виде цилиндров диаметром 0,03 м, высотой 0,05 м.

Измерялась величина ОЭС объектов исследования после технологического цикла и до начала испытаний ( $\rho_v$ ), после приложения постоянного и переменного напряжения различной величины и длительности ( $\rho_v$ ), температурный коэффициент сопротивления (ТКС), температура нагрева  $t$ . Измерения  $\rho_v$  и ТКС выполнялись по стандартным методикам. Диапазон температур при определении температурного коэффициента сопротивления составлял +20 – +200 °С (ГОСТ 21342.15-78 с изменениями, скорость нагрева 3–5 °С/мин).

Температура измерялась в центре образца резистора с помощью термопары общепромышленного назначения (хромель-копелевая термопара, отградуированная в соответствии с требованиями ГОСТ). Термопары были внедрены в тело резистора и изолированы слоем эпоксидной смолы или фторопластовой трубкой.

Характеристикой однородности структуры служил коэффициент вариации равномерности распределения фазовых составляющих  $K$  (%), величина которого характеризует степень отклонения распределения анализируемой фазы от однородного распределения (при уменьшении величины коэффициента вариации повышается однородность структуры). Сравнение рассеяния случайных значений параметров выполнялось по величине коэффициента вариации  $K$ , %, в выборке, содержащей не менее 25 изделий. Коэффициент вариации рассчитывался как отношение среднеквадратичного отклонения значения параметра в выборке к его среднему значению.

Сравнивались коэффициенты вариации значений температурного коэффициента сопротивления при изменении концентрации электропроводящего наполнителя в диапазоне 30–80 мас. % (массовых частей на 100 массовых частей матрицы) при разных материалах матрицы.

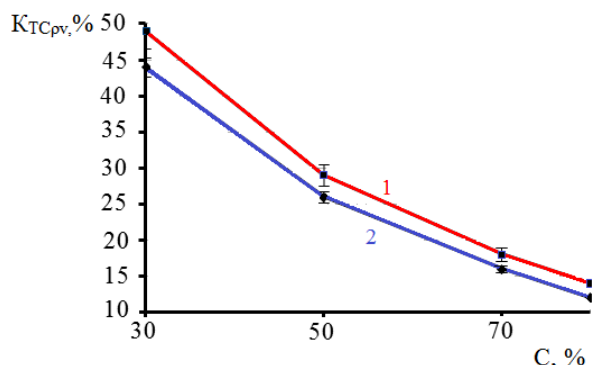
При обработке результатов измерений использованы стандартные статистические и математические пакеты, включающие методы описательной статистики, дисперсионного и регрессионного анализа. С их помощью выполнялся расчет полиномиальных уравнений регрессии, оценка их значимости, подсчет функций отклика, оценка значимости влияющих факторов и т. д. Статистически значимые отличия при сравнении выборок определялись с помощью T-test (проводился с уровнем значимости 0,05).

#### Результаты исследования

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1–3 и в таблице.

На рис. 1 в качестве примера представлен график зависимости коэффициента вариации величины ТКС в партии изделий от концентрации электропроводящего наполнителя.

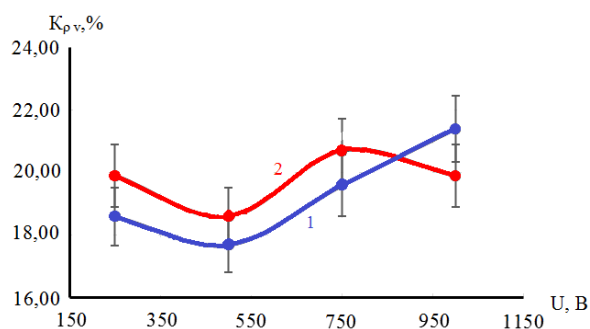
Установлено, что данная закономерность примерно одинакова для матриц обеих марок. По виду она сходна с закономерностью изменения коэффициента вариации величин  $\rho_v$  после технологического цикла при серийном изготовлении – при увеличении концентрации наполнителя коэффициент вариации уменьшается.



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента вариации величины ТКС от концентрации наполнителя: 1 – матрица СКМС-30АРК, наполнитель П-234; 2 – матрица БК-2055, наполнитель П-234

**Fig. 1.** Dependence of the temperature coefficient of resistance (TCR) value variation coefficient on concentration of the filler: 1 – matrix SKMS-30ARK, filler P-234; 2 – matrix BK-2055, filler P-234

На резисторы-образцы подавалось напряжение различной величины и длительности. Оценивался разброс  $\rho_v$  при нагреве ( $\rho_{v,t}$ ). На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента вариации величины  $\rho_v$  при изменении воздействующего напряжения в диапазоне 250–1000 В.



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента вариации величины объемного электрического сопротивления при нагреве от величины приложенного напряжения: 1 – переменное, 2 – постоянное (материал: матрица БК-2055, электропроводящий наполнитель – П-234, концентрация – 60 мас. %)

**Fig. 2.** Dependence of the coefficient of variation of the volumetric electrical resistance during heating on the value of the applied voltage: 1 – variable, 2 – constant (material: matrix BK-2055, electrically conductive filler – P-234, concentration – 60 wt. %)

Анализ результатов экспериментов показал, что графики зависимости изменения коэффициента вариации от характера приложенного напряжения (переменный, постоянный) практически однотипны, с учетом пятипроцентного статистического разброса параметров. Род тока в проведенных экспериментах не влияет на коэффициент вариации  $\rho_v$  в партии образцов одинакового состава.

Представляло интерес сопоставить результаты расчета коэффициента вариации для  $\rho_v$ , ТКС, величин

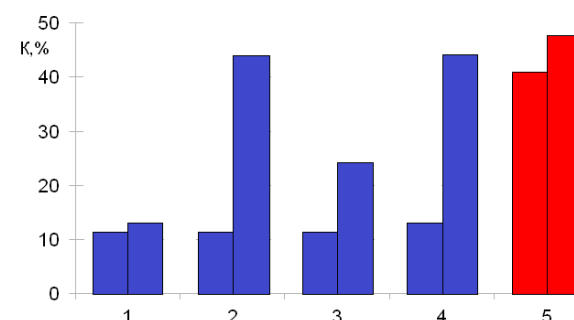
ны температуры в теле резистора (серия включала 25 изделий).

Известно, что полимер более подвержен действию высоких температур, чем электропроводящий наполнитель [12, 13]. По этой причине эксперименты проводились на материалах, содержащих разные матрицы. В таблице результаты экспериментов представлены для материалов, содержащих в качестве матрицы каучуки марок СКМС-30АРК, БК-2055. Электропроводящий наполнитель – технический углерод промышленных марок П-514, П-234, П-166Э при концентрации 80 массовых частей на 100 массовых частей каучука (разброс параметров в серии не превышал 5 % от указанных в таблице средних значений).

**Таблица.** Основные результаты экспериментов (измерений)

**Table.** The main results of the experiments (measurements)

Параметры Parameters	Электропроводящий наполнитель Electrically conductive filler					
	П-166Э P-166E		П-234 P-234		П-514 P-514	
	Материал матрицы Matrix material					
	СКМС-30АРК SKMS-30ARK	БК-2055 BK-2055	СКМС-30АРК SKMS-30ARK	БК-2055 BK-2055	СКМС-30АРК SKMS-30ARK	БК-2055 BK-2055
$K_{\rho v}$	8	11,8	10,3	14,4	16	18,4
$K_{TK\rho v}$ $K_{TC\rho v}$	13,9	12,1	16,9	14,9	20,8	19,4
$K_t$	10	8	12	9	15	13



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента вариации  $\rho_v$  от величины напряжения и длительности его воздействия: 1–4 – низкоомный материал, 5 – высокоомный материал. Левые столбцы: 1 – величина напряжения 60 В, длительность 72 с; 2 – 600 В, 72 с; 3 – 60 В, 720 с; 4 – 60 В, 720 с; 5 – 60 В, 72 с; правые столбцы: 1 – 60 В, 720 с; 2 – 600 В, 720 с; 3 – 600 В, 72 с; 4 – 600 В, 720 с; 5 – 600 В, 720 с

**Fig. 3.** Dependence of the coefficient of variation  $\rho_v$  on voltage magnitude and duration of its exposure: 1–4 – low resistance material, 5 – high resistance material. Left columns: 1 – voltage magnitude 60 V, duration 72 s; 2 – 600 V, 72 s; 3 – 60 V, 72 s; 4 – 60 V, 720 s; 5 – 60 V, 72 s; right columns: 1 – 60 V, 720 s; 2 – 600 V, 720 s; 3 – 600 V, 72 s; 4 – 600 V, 720 s; 5 – 600 V, 720 s

Результаты экспериментов показали, что коэффициент вариации величин ТКС, температуры и  $\rho_v$  при нагреве зависит от вида полимера и наполнителя. Коэффициент вариации  $\rho_v$  резистора до испытаний при замене материала матрицы с аморфного на кристаллический увеличивается, при нагреве закономерность обратная – величина коэффициента уменьшается или сохраняется практически неизменной. Закономерности изменения коэффициента вариации в серии значений ТКС и температуры совпадают.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента вариации  $\rho_v$  от величины и длительности воздействия напряжения для материалов, отличающихся значениями  $\rho_v$  более чем на порядок (высокоомный – 540,7 Ом м, низкоомный – 3,2 Ом м).

Анализ результатов, представленных на рис. 3, позволил выявить следующие закономерности.

1. При увеличении напряжения величина  $K$  (разброс параметра ОЭС в партии образцов одинакового состава из-за многокомпонентности структуры материала, связанный с неоднородным распределением технического углерода в каучуке) возрастает как для высокоомных, так и для низкоомных материалов.
2. Увеличение длительности воздействия напряжения малой величины (60 В) на низкоомные материалы практически не влияет на коэффициент вариации величины  $\rho_v$ . При возрастании ОЭС влияние времени приложения напряжения на коэффициент вариации возрастает даже при малой величине напряжения. Различие в величинах  $K$  для высокоомного и низкоомного материалов в проведенных экспериментах превышает двукратное).
3. Изменение длительности воздействия напряжения влияет на величину  $K$  сильнее, чем изменение его величины. Этот эффект усиливается в области высоких значений напряжения.

Значения коэффициентов вариации  $\rho_v$  при серийном изготовлении для различных уровней температуры сравнивались по законам распределения (Т-тест проводился с уровнем значимости 0,05). Установлено, что законы распределения случайных значений  $\rho_v$  и  $t$  совпадают. Законы распределения выборок (25 объектов) коэффициента вариации  $\rho_v$  в партии изделий после технологического цикла и при нагреве отличаются. Из-за выявленного различия в законах распределения представляло интерес определить степень значимости по вкладу основных рецептурных компонентов в формирование коэффициента вариации изучаемых параметров. Установлено, что порядок влияния основных компонентов на коэффициент вариации различен. Степень значимости основных рецептурных компонентов по влиянию на разброс величины сопротивления после технологического цикла имеет следующую последовательность – концентрация, марка технического углерода, вид полимера; разброс по изменению  $\rho_v$  при нагреве имеет другую последовательность влияния факторов – концентрация, вид полимера, марка технического углерода.

Воздействие повышенных температур на полимерные композиционные материалы приводит к ком-

плексу разнообразных процессов: термоокислительная деструкция, механические деформации, изменяющие зазор в проводящих контактах, релаксация механических напряжений и химических процессов, структурирование и т. д. [4, 5, 13–16]. Результаты экспериментов по разбросу исходного объемного электрического сопротивления и при нагреве можно связать с разной степенью влияния на процессы электропроводности и тепловые процессы ряда факторов, например, плотности полимеров [5, 8]. Теплопроводность полимеров в значительной степени связывают с их плотностью: при повышении степени кристалличности полимера его теплопроводность выше. Степень влияния плотности полимера на электропроводность композиционного материала является менее существенной [8, 13]. В ряде работ [17–21] большое внимание уделено изучению влияния различных факторов (прежде всего, температуры) не только на электропроводность наполненных полимеров, но и на другие их физические свойства: термомеханические, барьерные и др.

### Заключение

Производство и использование электротехнических изделий из полимерных композиционных материалов сдерживаются сложностью выбора компонентов, обеспечивающих требуемые потребительские свойства. Опыт производства и эксплуатации электротехнических изделий из композиционных материалов показывает, что на их конкурентоспособность по показателям «цена – потребительские качества» существенно влияет воспроизводимость и стабильность рабочих характеристик, которые, в свою очередь, определяются поведением материалов в процессе переработки их в изделия.

Комплекс выполненных исследований включал:

- изучение на серии изделий влияния на воспроизводимость величины  $\rho_v$  и ТКС наполненных техническим углеродом каучуков следующих факторов: температуры, величины  $\rho_v$ , величины и длительности воздействия электрического поля, рода тока (постоянный, переменный);
- анализ зависимости коэффициента вариации значений  $\rho_v$  при действии повышенных температур от основных рецептурных параметров (концентрации и марки технического углерода, вида полимера).

Установлено, что зависимость коэффициента вариации и величины ТКС от концентрации подчиняется следующей закономерности: при уменьшении концентрации разброс возрастает. Закономерность справедлива для всех используемых в исследованиях марок электропроводящего наполнителя и видов полимера.

Результаты экспериментов подтвердили, что коэффициент вариации объемного электрического сопротивления при нагреве постоянным и переменным током в исследуемом диапазоне приложенного напряжения до 1000 В практически не изменяется по величине.

Выявлена возможность направленного регулирования коэффициента вариации  $\rho_v$  полимерных резисторов при нагреве в слабых электрических полях. Для уменьшения разброса сопротивления в серии изделий в результате повышения температуры необходима корректировка состава материала – регулировать требуемую электропроводность в условиях высокой концентрации наполнителя, используя для этого стойкий к действию температуры полимер. Замена низкоструктурного технического углерода на высокоструктурный, принципиально важная для формирования величины  $\rho_v$  после технологического цикла,

практически не влияет на коэффициент вариации значений  $\rho_v$ .

Подбор материала матрицы и электропроводящего компонента позволяет формировать структуру с регулируемой степенью однородности (коэффициент вариации равномерности распределения фазовых составляющих на уровне 10 % при действии повышенной температуры). Это способствует сокращению ресурсов, необходимых для производства электротехнических изделий с требуемыми электрофизическими характеристиками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stress softening of carbon black filled SBRs submitted to various large strain uniaxial tension cycles / M. Brieu, J. Diani, C. Mignot, C. Moriceau // *Procedia Engineering*. – 2010. – № 1 (2). – P. 1291–1296.
2. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials / J.-M. Thomassina, C. Jérômea, T. Pardoeb, C. Baillyb, I. Huynenb, C. Detrembleura // *Materials Science and Engineering*. – 2013. – V. 74. – Iss. 7. – P. 211–232.
3. Zhang W., Dehghani-Sanij A.A., Blackburn. R.S. Carbon based conductive polymer composites // *Journal Materials Science*. – 2007. – V. 42. – P. 3408–3418.
4. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. – М.: Научный мир, 2009. – 384 с.
5. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1977. – 260 с.
6. Electrical conduction hysteresis in carbon black-filled butyl rubber compounds / M.A. Alzamil, K. Alfaramawi, S. Abboudy, L. Abulnasr // *International Journal of Modern Physics*. – 2018. – № 32 (09). – P. 1–10.
7. Berki P., Göbl R., Karger-Kocsis J. Structure and properties of styrene-butadiene rubber (SBR) with pyrolytic and industrial carbon black // *Polymer Testing*. – 2017. – V. 61. – P. 404–415.
8. Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites // *Composite Interfaces*. – 2019. – V. 26 (8). – P. 729–750.
9. Janke W. Computer simulation studies of polymer adsorption and aggregation – from flexible to stiff // *Physics Procedia*. – 2015. – № 68. – P. 69–79.
10. The role of conductive pathways in the conductivity and rheological behavior of poly (methyl methacrylate)–graphite composites / X. Liu, Y. Pan, X. Hao, K. Dai, D.W. Schubert // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2016. – № 133 (32). – P. 34–38.
11. Гуль В.Е., Шенфилд Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
12. Абраменко Е.А., Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Исследование свойств полиэтилена с наноразмерными наполнителями специальной обработкой изображений макроструктуры // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2008. – Т. 51. – № 7. – С. 39–42.
13. Минакова Н.Н., Сквирская И.И., Ушаков В.Я. Исследование природы нестабильности основных характеристик крупногабаритных полимерных резисторов // *Электричество*. – 2001. – № 3. – С. 38–42.
14. Special electrical conductivity of carbon black-filled two-phased thermoplastic vulcanizates / H. Tian, M. Tian, H., Zou Z. Dang, L. Zhang // *Journal Applied Polymer Science*. – 2010. – V. 117. – Iss. 2. – P. 691–699.
15. Improvement of carbon black based polymer composite electrical conductivity with additions of MWCNT / N. Gorshkov, I. Ilinykh, D. Muratov, E. Kolesnikov, S. Anshin, I. Mazov, J.-P. Issi, D. Kusnezov // *Composites Science and Technology*. – 2016. – V. 129. – P. 79–85.
16. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Применение текстурного анализа к оценке работоспособности наполненных полимеров при повышенных температурах // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2016. – Т. 58. – № 11. – С. 134–140.
17. Temperature coefficients of electrical conductivity and conduction mechanisms in butyl rubber-carbon black composites / M.A. Alzamil, K. Alfaramawi, S. Abboudy, L. Abulnasr // *Journal of Electronic CK Materials*. – 2018. – V. 47 (2). – P. 1665–1672.
18. Malas A., Das A. Influence of modified graphite flakes on the physical, thermo-mechanical and barrier properties of butyl rubber // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 69 (9). – P. 38–46.
19. Enhancing the electrical conductivity of carbon black-filled immiscible polymer blends by tuning the morphology / Y. Pan, X. Liu, X. Hao, Z. Starý, D.W. Schubert // *European Polymer Journal*. – 2016. – V. 78. – P. 106–115.
20. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding effectiveness of polymeric nanocomposites filled with iron/wüstite nanoparticles // *Procedia Materials Science*. – 2015. – № 11. – P. 700–705.
21. Topical issue on nanocomposites. preface: conductive polymer composites with segregated structures / Huan Pang, Ling Xu, Ding-Xiang Yan, Zhong-Ming Li // *Progress in Polymer Science*. – 2014. – V. 39. – Iss. 11. – P. 1908–1933.

Поступила: 06.12.2019 г.

## Информация об авторах

**Минакова Н.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информационной безопасности Алтайского государственного университета.

**Ушаков В.Я.**, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор отделения энергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.9:538.9

## REGULATION OF REPRODUCTION OF POLYMER RESISTOR PARAMETERS AT INCREASED TEMPERATURES

Natalya N. Minakova<sup>1</sup>,  
minakova@asu.ru

Vasily Ya. Ushakov<sup>2</sup>,  
vyush@tpu.ru

<sup>1</sup> Altai State University,  
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the fact that resistive polymer composite materials are actively used in various electrical devices. Diversified electrical devices are made of rubber filled with carbon black, having available feedstock and the possibility of industrial manufacturing technology. Their use is constrained by the complexity of the choice of components to provide the required electrophysical properties. The scatter of parameters associated with the multicomponent structure increases the cost of raw materials for the manufacture of finished products.

**The main aim** of the research is to assess the possibility of improving the reproducibility of properties in a series of electrical products for a specific field of operation due to prescription techniques.

**The objects** of the research are the instability (scatter) of the temperature coefficient of resistance, a change in the volume electric resistance when heated by direct or alternating electric current of various magnitude and duration. The studied composite materials differed in concentration, brand of the electrically conductive component, and the type of polymer.

**Research methods:** measurements of the electrophysical characteristics of resistive polymer composite materials, dispersion, regression, and correlation analyzes.

**Results.** The authors have determined the regularities of the behavior of the variation coefficient and the temperature coefficient of resistance with a change in the concentration of the conductive filler (soot) and the type of rubber when heated by direct and alternating current in the range of applied voltage up to 1000 V. The authors developed recommendations on how to increase the uniformity of the structure of polymer composite materials designed to operate at elevated temperatures. The implementation of these recommendations helps to save the required resources (materials, energy, and time) due to the increase in reproducibility of the volume electrical resistivity when heating electrical products during operation.

### Key words:

Resources saving, filled polymers, volume electric resistance, temperature coefficient of resistance, coefficient of variation, elevated temperature.

### References

- Brieu M., Diani J., Mignot C., Moriceau C. Stress softening of carbon black filled SBRs submitted to various large strain uniaxial tension cycles. *Procedia Engineering*, 2010, no. 1 (2), pp. 1291–1296.
- Thomassina J.-M., Jérôme C., Pardoeb T., Baillyb C., Huynenb I., Detrembleura C. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. *Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 74, Iss. 7, pp. 211–232.
- Zhang W., Dehghani-Sanij A.A., Blackburn. R.S. Carbon based conductive polymer composites. *Journal Materials Science*, 2007, vol. 42, pp. 3408–3418.
- Askadsky A.A., Khokhlov A.R. *Vvedenie v fiziko-khimiya polimerov: monografiya* [Introduction to the physical chemistry of polymers]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 384 p.
- Lipatov Yu.S. *Fiziko-khimicheskie osnovy napolneniya polimerov* [Physical and chemical bases of polymer filling]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 260 p.
- Alzamil M.A., Alfaramawi K., Abboudy S., Abulnasr L. Electrical conduction hysteresis in carbon black-filled butyl rubber compounds. *International Journal of Modern Physics*, 2018, no. 32 (09), pp. 1–10.
- Berki P., Göbl R., Karger-Kocsis J. Structure and properties of styrene-butadiene rubber (SBR) with pyrolytic and industrial carbon black. *Polymer Testing*, 2017, vol. 61, pp. 404–415.
- Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites. *Composite Interfaces*, 2019, vol. 26 (8), pp. 729–750.
- Janke W. Computer simulation studies of polymer adsorption and aggregation – from flexible to stiff. *Physics Procedia*, 2015, no. 68, pp. 69–79.
- Liu X., Pan Y., Hao X., Dai K., Schubert D.W. The role of conductive pathways in the conductivity and rheological behavior of poly (methyl methacrylate)–graphite composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, no. 133 (32), pp. 34–38.
- Gul V.E., Shenfield L.Z. *Elektroprovodyashchie polimernye kompozity* [Electrically conducting polymer compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p.
- Abramenko E.A., Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Investigation of the properties of polyethylene with nanodimensional fillers by special processing of macrostructure images. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51 (7), pp. 701–705. In Rus.
- Minakova N.N., Skvirskaya I.I., Ushakov V.Ya. Issledovanie prirody nestabilnosti osnovnykh kharakteristik krupnogabaritnykh polimernykh rezistorov [Investigation of the instability nature of main characteristics or large size polymer resistors]. *Elektrichestvo*, 2001, no. 3, pp. 38–42.
- Tian H., Tian M., Zou H., Dang Z., Zhang L. Special electrical conductivity of carbon black-filled two-phased thermoplastic vulcanizates. *Journal Applied Polymer Science*, 2010, vol. 117, Iss. 2, pp. 691–699.
- Gorshkov N., Ilinykh I., Muratov D., Kolesnikov E., Anshin S., Mazov I., Issi J.-P., Kusnezov D. Improvement of carbon black based polymer composite electrical conductivity with additions of MWCNT. *Composites Science and Technology*, 6 June 2016, vol. 129, pp. 79–85.



16. Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Application of texture analysis to assess the operability of filled polymers at high temperatures. *Russian Physics Journal*, 2016, vol. 58, no. 11, pp. 1627–1634. In Rus.
17. Alzamil M.A., Alfaramawi K., Abboudy S., Abulnasr L. Temperature coefficients of electrical conductivity and conduction mechanisms in butyl rubber-carbon black composites. *Journal of Electronic CK Materials*, 2018, vol. 47 (2), pp. 1665–1672.
18. Malas A., Das A. Influence of modified graphite flakes on the physical, thermo-mechanical and barrier properties of butyl rubber. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 69 (9), pp. 38–46.
19. Pan Y., Liu X., Hao X., Starý Z., Schubert D.W. Enhancing the electrical conductivity of carbon black-filled immiscible polymer blends by tuning the morphology. *European Polymer Journal*, 2016, vol. 78, pp. 106–115.
20. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding effectiveness of polymeric nanocomposites filled with iron/wüstite nanoparticles. *Procedia Materials Science*, 2015, no. 11, pp. 700–705.
21. Huan Pang, Ling Xu, Ding-Xiang Yan, Zhong-Ming Li. Topical issue on nanocomposites. Preface: conductive polymer composites with segregated structures. *Progress in Polymer Science*, 2014, vol. 39, Iss. 11, pp. 1908–1933.

Received: 6 December 2019.

#### Information about the authors

**Natalya N. Minakova**, Dr. Sc., professor, Altai State University.

**Vasily Ya. Ushakov**, Honored Scientist and Engineer of the RF, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.131

## РАЙОНИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТРАССЫ ТРУБОПРОВОДА НА ВОСТОЧНО-МЕССОЯХСКОМ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Строкова Людмила Александровна<sup>1</sup>,  
sla@tpu.ru

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

Леонова Анна Владимировна<sup>1</sup>,  
avleonova@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью оценки существующих инженерных геологических условий в отношении предполагаемого использования участка Восточно-Мессояхского месторождения Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа для строительства трубопровода.

**Целью** работы является оценка геокриологических процессов и построение карты инженерно-геокриологического районирования территории трассы.

**Объектами** исследования являются компоненты геологической среды, рассматриваемые при проектировании участка освоения Восточно-Мессояхского месторождения

**Методы.** Составление карты инженерно-геокриологического районирования выполнено на основе анализа данных региональных геологических исследований, локальных инженерно-геологических изысканий по трассе. При составлении карты инженерно-геокриологического районирования учитывались: состав, температура грунтов, показатели физико-механических свойств грунтов, характер распространения многолетнемерзлых пород, гидрогеологические условия, наличие и степень пораженности территории геологическими и криогенными процессами.

**Результаты.** Недостаточная изученность, плохая проходимость, значительная площадь территории потребовали использовать метод ключевых участков. Были выбраны три типовых участка, в их пределах установлены закономерности состава, состояния и свойств грунтов и грунтовых вод для последующей экстраполяции на всю изучаемую площадь. При районировании использована цепочка из шести таксонов: регион–область–район–подрайон–участок–подучасток. Регион выделен по структурно-тектоническому признаку, область – по характеру рельефа, сложившемуся в новейший период. Районы выделены по территории развития одинаковых геолого-генетических комплексов отложений. Выделено 3 района, 1 подрайон, 8 участков и 12 подучастков. Участки выделены по литологическому составу верхней части разреза. Подучастки выделены по степени льдистости грунтов. Дана характеристика выделенных таксонов с указанием развитых на территории геологических процессов.

### Ключевые слова:

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

### Введение

Инженерно-геологические условия Западно-Сибирской плиты освещены в работах В.Т. Трофимова, Ю.Б. Бадю, Ю.К. Васильчук, Г.А. Голодковской, Д.С. Дроздова и других авторов [1–4]. В них описаны основные инженерно-геологические и геокриологические закономерности региона. Методике геокриологического районирования территорий строительства трубопроводов посвящены работы С.Н. Титкова, Ф.М. Ривкина и др. [5, 6], в которых показана решающая роль в формировании инженерно-геологических условий принадлежит горным породам, предопределяющим характер рельефа, развитие экзогенных геологических процессов, обводненность территории. В настоящей работе рассматриваются инженерно-геологические условия территории трассы напорного нефтепровода от Восточно-Мессояхского месторождения до Пяяхинского месторождения. Протяженность трубопровода составляет 95,7 км. Площадь работ расположена в зоне распространения

многолетнемерзлых грунтов, что определяет устойчивость геологической среды к природным и техногенным процессам.

Целью работы является оценка геокриологических процессов и построение карты инженерно-геокриологического районирования территории трассы.

### Методы исследования и эксперимент

Исследование включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях, выполненных в 2013 и 2017 гг. при участии Э.И. Галеевой, инженерно-геологическое типологическое картографирование, проведенное авторами в 2019 г. в отделении геологии ТПУ.

### Характеристика природных условий территории месторождения

Восточно-Мессояхское месторождение, расположенное в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа, было открыто в 1967 г. [7]. В гео-

морфологическом отношении в пределах трассы встречены следующие равнины.

1. Области преобладания процессов транспортировки вещества приурочены к пойменным террасам и руслам рек ( $aH$ ), сложенных песками, супесями, суглинками, с редкими включениями гравия, гальки и валунов (до 8 м).
2. Аккумулятивная террасированная аллювиальная равнина представлена поверхностями первой ( $a^1\Pi_4-H$ ) и второй ( $a^2\Pi_3$ ) аллювиальных надпойменных террас, сложенных переслаиванием суглинков, супесей, песков с незначительной примесью галечников (до 10–14 м).
3. Аккумулятивные озерная, озерно-ледниковая равнины, сложенные суглинисто-песчаными отложениями, ленточными глинами (до 20 м), т. н. Парисентовский гляциолимний ( $Ig\Pi_{гр}$ ).
4. Холмисто-западинная денудационно-аккумулятивная равнина, распространенная на поверхности гляциофлювиальных отложений карского оледенения ( $g\Pi_6$ ). Морена сложена валунными суглинками, песками, флювиогляциальными песками и песчано-гравийно-галечными отложениями (до 50 м).

Биогенные образования представлены на протяжении всей трассы локально в виде торфа сильнольдистого [8].

Одним из главных факторов, определяющих инженерно-геологические условия территории, является сплошное распространение многолетнемерзлых грунтов сливающегося типа. Среднегодовая температура составляет от минус 5 до минус 7 °C в междуречьях и от минус 3 до минус 5 °C в речных долинах. Согласно вертикальному электрическому зондированию, 300 м – это максимальная мощность мерзлых пород. Под руслами рек и крупными озерами встречены талики. Мощность таликов может достигать от 20 до 30 м и более. Питание этих вод происходит путем инфильтрации поверхностных вод и атмосферных осадков, разгрузка – в понижения рельефа.

Безнапорные воды сезонного слоя распространены повсеместно и приурочены к плиоцен-четвертичным отложениям различного генезиса и возраста. Мощность сезонно-талого слоя изменяется в довольно широких пределах от 0,1 (в торфах) до 1 м (в песках). В пределах изучаемой территории геологический разрез вдоль всего трубопровода изучен 240 выработками до глубины 10 м [9]. Основная часть отложений представлена генетически неоднородными толщами, сложенными с поверхности синкриогенными породами, подстилаемыми на небольшой глубине (до 5–7 м) эпикриогенными. К синкриогенным образованиям относится верхняя часть разреза современного аллювия р. Мессояхи и ее притоков. Также отмечаются торфяники, вмещающие реликтовые сингенетические повторно-жильные льды высотой до 3...4 м. Лыдность торфов достигает 80...90 %. Подстилающие торфяники супесчано-суглинистые породы характеризуются суммарной лыдистостью до 50...60 %, слоисто-сетчатыми и сетчатыми криогенными текстурами. По температурным свойствам грунты классифициру-

ются как твердомерзлые. Кровля засоленных грунтов (морской тип засоления) расположена ниже 50 м от поверхности.

Сплошное распространение многолетнемерзлых пород обуславливает специфичный комплекс мерзлотных процессов. На обследуемой территории были зафиксированы следующие четыре группы опасных процессов, согласно классификации Э.Д. Ершова:

1. Собственно криогенные, обусловленные годовыми и многолетними колебаниями теплообмена на земной поверхности: а) морозобойное растрескивание и полигонально-жильные образования; б) морозное пучение (многолетнее криогенное пучение); в) наледообразование; г) термокарст.
2. Флювиальные, абразионные и водобалансовые, обусловленные тепловыми механическим взаимодействием водных масс на оттаивающие и мерзлые горные породы, годовыми колебаниями водного баланса поверхности: а) термоэрозия; б) заболачивание; в) подтопление.
3. Гравитационные, обусловленные гравитацией, поверхностным и внутри грунтовым стоком вод, годовыми колебаниями теплообмена поверхности: а) солифлюкция.
4. Техногенные, обусловленные деятельностью человека.

Главным геологическим процессом на территории является заболачивание. Исключительно сильная заболоченность и заозеренность района связана с избыточным атмосферным увлажнением всей территории, близким залеганием многолетнемерзлых пород, являющихся водоупором, и слабой дренированностью равнин и террас исследуемого района. Общая заболоченность местности составляет 19 %.

Территория относится к подтопленной в естественных условиях, по времени развития процесса – к сезонно (ежегодно) подтапливаемой, согласно СП 11-105-97, ч. II. Доля в пораженности территории геологическими процессами составляет 21 %. Основными причинами возникновения и развития подтопления являются: слабая расчлененность рельефа; наличие слоя слабоводопроницаемых грунтов в разрезе; нарушение естественного стока; нарушение слоя растительного покрова.

Термоэрозия проявляется в формировании отдельных различных размеров оврагов, врезов и промоин. Наибольшему риску термоэрозии подвержены отвесные участки речных долин и берега озер. Разрушению временными водотоками подвержены в большей степени пески, реже супеси и суглинки. При строительстве территории происходит резкая интенсификация термоэрозии, связанная с увеличением объема и концентрации поверхностного стока, а также с улучшением размываемости грунтов при нарушении и удалении растительного и мохового покровов [10–14]. Их доля в пораженности территории геологическими процессами составляет около 5 %.

Для описания процессов использованы фотоматериалы, выполненные при рекогносцировочном обследовании напорного нефтепровода в период с мая по июнь 2016 г. в пределах обследуемого трубопровода.

Привязка фотографий приведена по проектному пикетажу (рис. 1).

Одним из неблагоприятных и значимых процессов, широко развитых в исследуемом районе, является современный термокарст, который приводит к формированию отрицательных форм рельефа в результате вытаивания подземных льдов. Образующиеся при этом котловины и озера имеют округлую форму и незначительную глубину.

Высокая льдистость поверхностных отложений, наличие в них залежей льда определяют благоприятные условия для развития термокарстовых процессов, хотя суровость климата сдерживает активность их проявления.

Техногенные воздействия могут резко активизировать термокарст. Основные участки потенциально

го развития термокарста имеют в своем строении сильнольдистые грунты с высокой температурой. Меньше подвержены влиянию участки, содержащие в строении слабольдистые грунты. Доля термокарста в пораженности территории геологическими процессами составляет 13 %.

Один из важных криогенных процессов, встречаемых на рассматриваемом участке, – солифлюкция. Солифлюкционное течение грунтов сезонноталого слоя имеет распространение на склонах. Медленное течение грунта на склонах наблюдается на участках развития тонкодисперсных пород сезонноталого слоя, формируя террасы, ориентированные параллельно подошве склона. Их доля в пораженности территории геологическими процессами составляет 2 %.



Рис. 1. Распространение геологических процессов по трассе

Fig. 1. Distribution of geological processes along the route

Следующим из самых распространенных процессов в зоне трассы является морозобойное растрескивание и повторно-жильное льдообразование. В результате возникают системы полигонов, приуроченные к участкам с мощным моховым или торфяным покровом, с достаточным увлажнением, со сравнительно небольшим снегонакоплением. Его доля в пораженности территории геологическими процессами составляет около 32 %.

Наиболее распространенным из неблагоприятных инженерно-геокриологических процессов является морозное пучение грунтов сезонноталого слоя. Наиболее активно протекает пучение на обводненных и заболоченных участках. Сезонные бугры пучения формируются за счет замерзания верховодки. Распространены также формы площадного пучения торфяников. Этот тип пучения представлен на торфяниках, занимающих центральные части водоразделов, в долинах ручьев и временных водотоков. Его доля в пораженности территории геологическими процессами составляет около 6 %.

На момент выполнения полевых работ в пределах обследуемой трассы бугры пучения встречены не были. Гидролакколиты высотой от 2 м и более наблюдались локально, на удалении от нефтепровода на расстоянии 500 м и более. Гидролакколиты (булгуняхи) имеют куполовидную форму со слегка приплюснутой вершиной, четкую морфологическую выраженность, поверхность их часто хорошо дренирована. Склоны гидролакколитов довольно крутые, особенно к основанию, где падение достигает 40° и более. К вершине кривизна поверхности уменьшается. Характер поверхностного слоя гидролакколита определяет общий облик покрывающей его растительности. Гидролакколиты-булгуняхи поросли мохово-кустарничковой растительностью с дерниками пушицы и пятнами вейника. Растительный покров несколько препятствует деградации торфа с поверхности бугров путем физического выветривания. Под торфяной оболочкой, что особенно хорошо бывает заметно на обнаженных от торфа вершинах, находится та же самая порода, которая подстилает торф на окружающей гидролакколит низменности. С поверхности большинство бугров сложено торфом мощностью 1...6 м, который подстилается льдонасыщенными суглинками и супесями, глинами с тонкими прослоями песков. На некоторых буграх торф отсутствует, с поверхности развиты заторфованные тонкодисперсные грунты. Льдогрунтовое ядро залегает в основном на глубине 3...8 м, характерны прослои льда толщиной 5...20 см, интервал между ними 0,5...5 см.

Вдоль трассы было встречено наледеобразование. Его доля в пораженности территории геологическими процессами составляет около 2 %. Наледи, приуроченные к русловой и пойменной части, имеют обычно плосковыпуклую форму и максимальную мощность на наиболее низких элементах рельефа. Толщина льда уменьшается от более высоких поверхностей, покрытых наледью, к ее периферии и нижнему по долине концу. Поверхность надледного тела обычно бывает неровная, осложненная буграми. Весной наледи в

долинах рек являются препятствием для пропуска полых вод. Воды ручья или реки, встречая на своем пути наледное тело, могут растекаться по нему, следуя микрорельефу поверхности наледи, образовывать русла, часто многочисленные. Русла сначала проходят во льду наледи, а по мере таяния достигают минерального ложа и вырабатывают в нем свое «корыто». Число таких русел, их положение и водный режим каждый год различны. Они определяют динамичность и неустойчивость наносов в основании наледи. Если наледь покрывает пойменную поверхность, то такие русла приводят к размыву пойменной фации аллювия и выносу такого материала вниз по ручью или реке и переложению его в другом месте. Полые воды, несущие взвешенный материал, могут откладывать его на лед наледи.

### Результаты

В 2019 г. в отделении геологии ТПУ обобщен опыт картирования, описанный в литературе [15–26], выполнен анализ инженерно-геокриологических данных по трассе, что позволило выявить закономерности изменения природных условий. Всего было проанализировано: колонки 240 инженерно-геокриологических скважин глубиной 10 м, 40 точек измерения температурных данных грунта, маршрутные наблюдения вдоль трассы трубопровода, дешифрирование топографической основы и космоснимков.

Для типизации территории по инженерно-геологическим условиям были рассмотрены главные компоненты геологической среды: рельеф, геологическое строение, гидрогеология, состав, строение и состояние грунтовых толщ, геологические процессы. При районировании использована цепочка из шести таксонов: регион–область–район–подрайон–участок–подучасток. Каждому таксону присвоен индекс. Регион выделен по структурно-тектоническому признаку – Западно-Сибирская плита. Область – Русско-Мессояхская, выделена по неотектоническому признаку, а именно по направленности неотектонических движений, рельефу, строению и мощности четвертичных отложений. Районы были выделены по территории развития одинаковых геолого-генетических комплексов отложений (рис. 2). Выделены три района:

- 1) современная и верхнечетвертичная аллювиальная равнина;
- 2) верхнечетвертичная озерно-ледниковая равнина;
- 3) среднечетвертичная моренная равнина.

Недостаточная изученность при значительной площади территории потребовала при дальнейшем выделении таксонов использовать метод ключевых участков. В каждом районе было выбрано по одному ключевому участку, расположенному в центре изучаемого геологического поля. Размеры ключевых участков 7×1,5 км. В пределах ключевых участков (эталонов) установлены закономерности состава, состояния и свойств грунтов и грунтовых вод для последующей экстраполяции на всю площадь района. В пределах эталонов выделены участки по литологическому составу верхней части разреза. Далее каждый участок делится на подучастки по степени льдистости



грунтов. Ниже приведены характеристики каждого района.

Район I. Аллювиальная равнина  
(абсолютные отметки 20...30 м)

Протяженность 35 км (или 36% от длины трассы). Среднегодовая температура пород изменяется от минус 2,0 до 2,0 °С.

В данном районе выделены два подрайона: поймы и надпойменные террасы, внутри которых выделены участки по литологическому составу верхней части разреза: (а – торф, б – суглинок, в – супесь, г – песок). Каждый участок делится на подучастки по степени льдистости грунтов, которая меняется от малоледистого до сильноледистого. Пески в верхнем слое встречаются редко и приурочены к поймам рек. Для района характерно развитие термоэрозийных процессов из-за наличия мерзлых, малоледистых грунтов в верхней части разреза. Термоэрозийные процессы

встречены в пределах 4,5 км (или 5 % от общей длины трассы). Такое явление происходит непосредственно у крутых бортов речных долин и берегам озер. В рельефе проявляется в форме различных оврагов, врезов и промоин. При техногенном вмешательстве термоэрозия проявится из-за нарушения почвенно-растительного слоя, которое повлечет увеличение объема и концентрации поверхностного стока.

Район II. Озерно-ледниковая равнина  
(абсолютные отметки 30...45 м)

Протяженность 24 км (или 25% от длины трассы). Разрез слагают супеси и пески, в основном мелкозернистого состава, которые варьируются от мерзлых до льдистых. Местами встречаются торфяники, которые содержат полигонально-жильные льды. Среднегодовая температура пород от минус 3,0 до 4,0 °С, низкая температура свойственна полигональным торфяникам.

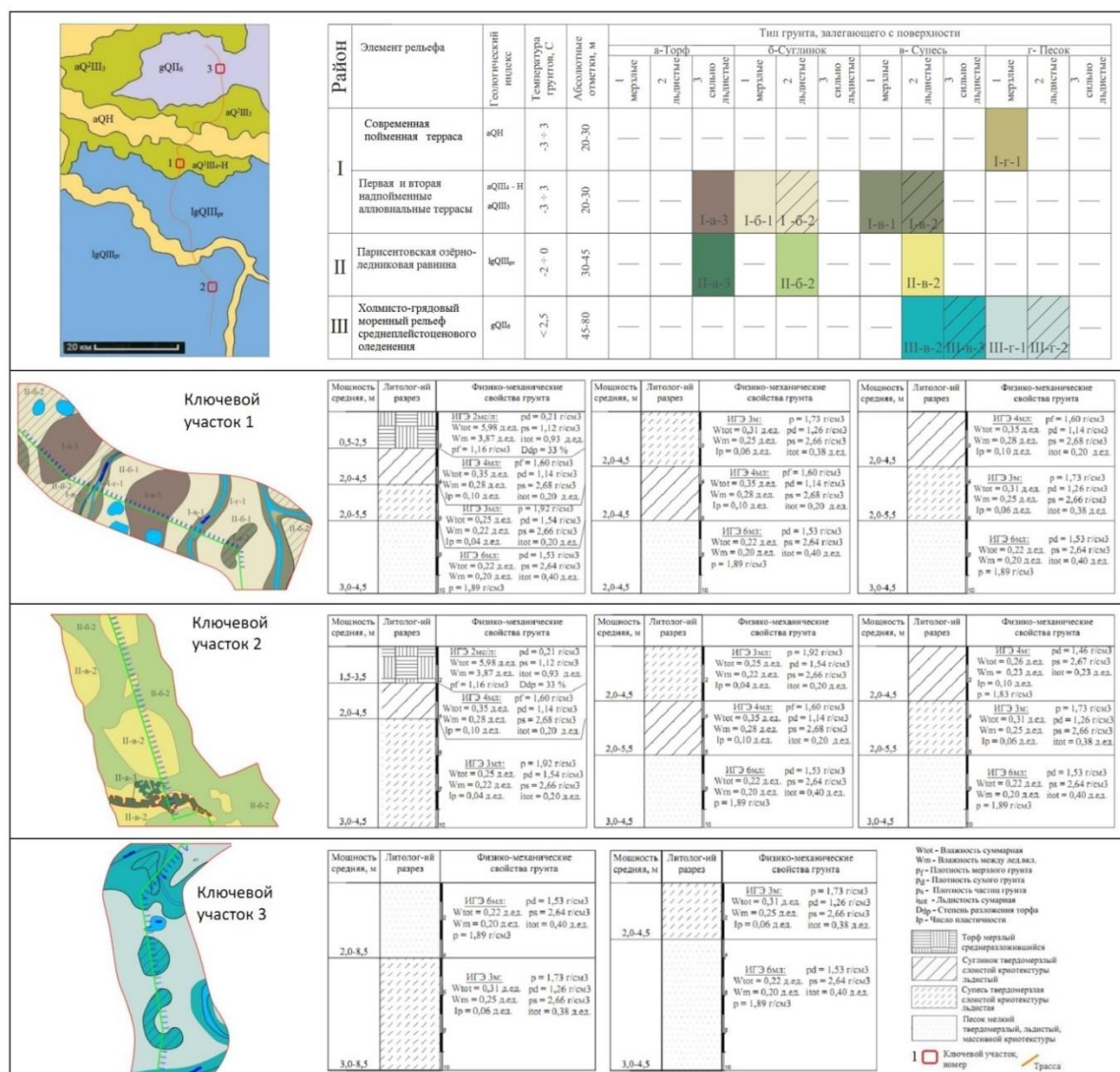


Рис. 2. Карта геокриологического районирования с характеристикой таксонов по ключевым участкам. Масштаб карт ключевых участков 1:500

Fig. 2. Map of geocryological zoning with characteristics of taxa in the key sites. Scale maps of key sites at 1:500

В данном районе выделены участки по составу верхней части разреза (а – торф, б – суглинок, в – супесь). По степени льдистости каждый участок меняется от льдистого до сильнольдистого, что отличает его от первого района.

Для второго района характерно развитие процесса заболачивания, что связано с избыточным атмосферным увлажнением, близким залеганием многолетнемерзлых пород, которые становятся водоупором и осложняют дренаж. Общая заболоченность местности составляет около 19 %.

Район III. Моренная равнина  
(абсолютные отметки 45...60 м)

Протяженность 28 км (или 29 %) от длины трассы. Разрез слагают суглинки и глины. Температура пород зависит от снегонакопления, которое происходит за счет метелевого переноса, среднегодовая температура пород колеблется до 2,5 °С.

В данном районе выделяются два типа участков по составу верхней части разреза: сложенные супесью либо песком. Степень льдистости грунтов меняется от слабольдистой до льдистой.

Для третьего района наиболее важный криогенный процесс – солифлюкция, который занимает 2 % от общей площади участка трассы (примерно 2 км).

#### Выводы

В результате инженерно-геокриологического районирования территории установлены закономерности изменения состава, строения и свойств талых и мерзлых пород, распространения геологических процессов. При районировании использована цепочка из шести таксонов: регион–область–район–подрайон–участок–подучасток. Самый крупный таксон – регион, выделен по структурно-тектоническому признаку, следующий таксон – область – выделен по неотектоническому признаку, по направленности неотектонических движений, рельефу, строению и мощности четвертичных отложений. В пределах области выделены районы по территории развития одинаковых геолого-генетических комплексов отложений. Были

выделены и охарактеризованы три района: современная и верхнечетвертичная аллювиальная равнина; верхнечетвертичная озерно-ледниковая равнина и среднечетвертичная моренная равнина. Характеристики районов даны по составу, состоянию и физико-механическим свойствам грунтов верхней части разреза и распространению геологических процессов.

Основная часть отложений представлена генетически неоднородными толщами, сложенными с поверхности синкриогенными суглинками, супесями, подстилаемыми на небольшой глубине (до 5–7 м) эпикриогенными грунтами. К синкриогенным образованиям относится верхняя часть разреза современного аллювия р. Мессояхи и ее притоков. Также отмечаются торфяники, вмещающие реликтовые сингенетические повторно-жильные льды высотой до 3–4 м. Льдистость торфов достигает 80–90 %. Подстилающие торфяники – супесчано-суглинистые породы – характеризуются суммарной льдистостью 50–60 %, слоистосетчатыми и сетчатыми криогенными текстурами.

Сплошное распространение многолетнемерзлых пород обуславливает специфичный комплекс мерзлотных процессов: термоэрозия, термокарст, солифлюкция, морозобойное растрескивание и повторно-жильное льдообразование, криогенное пучение грунтов сезонноталого слоя, которое активно проявляется на заболоченных и обводненных участках всех геоморфологических уровней. Исключительно сильная заболоченность и заозеренность района связана с избыточным атмосферным увлажнением всей территории, близким залеганием многолетнемерзлых пород, являющихся водоупором, и слабой дренированностью равнин исследуемого района.

Знание инженерно-геокриологических условий территории важно для прогноза их изменения при техногенном освоении территории для сохранения устойчивости геологической среды.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов, Ю.Б. Бадю, Ю.К. Васильчук, П.И. Кашперюк, В.Г. Фирсов. – М.: Наука, 1987. – 219 с.
2. Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. О роли подхода при инженерно-геологическом районировании // Геозкология. – 1995. – № 1. – С. 86–95.
3. Голодковская Г.А. Принципы инженерно-геологической типизации месторождений полезных ископаемых // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – Вып. 5. – С. 355–369.
4. Дроздов Д.С., Дубровин В.А. Геоэкологические проблемы нефтегазового недропользования в российской Арктике // Криосфера земли. – 2016. – Т. XX. – № 4. – С. 16–27.
5. Титков С.Н. Инженерно-геокриологическое картографирование при инженерно-геологических изысканиях для строительства магистральных трубопроводов в криолитозоне // Инженерные изыскания. – 2014. – № 4. – С. 42–48.
6. Инженерно-геологическое обеспечение технико-экономического обоснования строительства трансконтинентальных нефтепроводов / Н.В. Иванова, И.Л. Кузнецова, Ф.М. Ривкин, С.Е. Суходольский, И.В. Чехина // Криосфера Земли. – 2003. – Т. 7. – № 4. – С. 65–75.
7. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 454 с.
8. Разумный А.В., Шкатова В.К. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист R-44 – Гыданский п-ов. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2019. – 303 с.
9. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной и рабочей документации. – Тюмень: ЗАО «ТюменьНИПИнефть», 2013. – 368 с.
10. 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.
11. Строкова Л.А., Елифанова 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.

12. 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.
13. Stroková 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 05.03.2020).
14. 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.
15. 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. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012046> (дата обращения 05.03.2020).
16. 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.
17. Variations in the building site categories in the underground mining region of Doubrava (Czech Republic) for land use planning / M. Marschalko, I. Yilmaz, M. Bednárík, K. Kubečka // Engineering Geology. – 2011. – V. 122. – P. 169–178.
18. Ullah K.M., Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: Case study Dhaka city // Transactions in GIS. – 2016. – V. 20 (1). – P. 20–37.
19. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas», (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // Geosciences. – 2013. – V. 1. – P. 46–62.
20. Мельников Е.С. Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции. – Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1983. – 199 с.
21. Active-layer thickness estimation from X-band SAR backscatter intensity / B. Widhalm, A. Bartsch, M. Leibman, A. Khomutov // The Cryosphere. – 2017. – № 11. – P. 483–496.
22. Permafrost zonation index map and statistics over the Qinghai-Tibet Plateau based on field evidence / B. Cao, T. Zhang, Q. Wu, L. Zhao, D. Zou // Permafrost and Periglacial Processes. – 2019. – V. 30. – № 3. – P. 178–194.
23. Water as a resource, stress and disturbance shaping tundra vegetation / J. Kemppinen, P. Niittynen, J. Aalto, P.C. le Roux, M. Luoto // Oikos. – 2019. – V. 128. – № 6. – P. 811–822.
24. Pleistocene periglacial imprinting on polygenetic soils and paleosols in the SW Italian Alps / M.E. d'Amico, E. Pintaldi, M. Catoni, M. Freppaz, E. Bonifacio // Catena. – 2019. – V. 174. – P. 269–284.
25. Relict periglacial soils on Quaternary terraces in the Central Ebro Basin (NE Spain) / R. Rodríguez-Ochoa, J.R. Olarieta, A. Santana, J.L. Peña-Monné, C. Sancho // Permafrost and Periglacial Processes. – 2019. – V. 30. – № 4. – P. 364–373.
26. Cochand M., Molson J., Lemieux J.-M. Groundwater hydrogeochemistry in permafrost regions // Permafrost and Periglacial Processes. – 2019. – V. 30. – № 2. – P. 90–103.

Поступила 12.03.2020 г.

#### Информация об авторах

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

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

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



UDK 624.131

## ZONING OF ENGINEERING-GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE PIPELINES ON VOSTOCHNO-MESSOYAKHSKOE OIL AND GAS CONDENSATE FIELD

**Lyudmila A. Strokova<sup>1</sup>,**  
sla@tpu.ru

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

**Anna V. Leonova<sup>1</sup>,**  
avleonova@tpu.ru

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

**The relevance** of the research is caused by the necessity to evaluate the existing engineering geological conditions in relation to the intended use of the plot Vostochno-Messoyakhskoe field of Tazovsky District, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug for construction of the pipeline.

**The aim** of this work is to evaluate geocryological processes and build a map of engineering-geocryological zoning of the route territory.

**Objects** of the research are the components of the geological environment considered in the design of the development of the Vostochno-Messoyakhskoe field

**Methods.** The map of engineering and geocryological zoning is based on the data from regional geological surveys, local engineering and geological surveys along the route. When mapping the composition, temperature of soil, physico-mechanical properties of soils, distribution of the permafrost and hydrogeological conditions, presence and degree of infestation site of geological and cryogenic processes were taken into account.

**Results.** Insufficient knowledge, poor traffic, and a large area of territory required the use of the key site method. We selected three typical sites and established regularities of the composition, condition and properties of soils and ground water within them for further extrapolation to the entire area under study. We used a chain of six taxa for zoning: region–area–district–subdistrict–section–site. There are 3 districts, 2 subdistrict, 8 sections and 12 sites. The paper describes the selected taxa.

### Key words:

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

The research was carried out at National Research Tomsk Polytechnic University within the program of improving competitiveness of Tomsk polytechnic University (VIU funds).

### REFERENCES

1. Trofimov V.T., Badu Yu.B., Vasilchuk Yu.K., Kashperuk P.I., Firsov V.G. *Geokriologicheskoe rayonirovanie Zapadno-Sibirskoy plity* [Geocryological zoning of the West Siberian plate]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 219 p.
2. Trofimov V.T., Ziling D.G. On the role of the approach to engineering-geological zoning. *Environmental Geoscience*, 1995, vol. 1, pp. 86–95. In Rus.
3. Golodkovskaya G.A. Printsipy inzhenerno-geologicheskoy tipizatsii mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Principles of engineering-geological typification of mineral deposits]. *Voprosy inzhenernoy geologii i gruntovedeniya* [Geology and soil science]. Moscow, Moscow State University Publ. house, 1983. Iss. 5, pp. 355–369.
4. Drozdov D.S., Dubrovin V.A. Geoecological problems of oil and gas subsoil use in the Russian Arctic. *Earth's cryosphere*, 2016, vol. XX, no. 4, pp. 16–27. In Rus.
5. Titkov S.N. Engineering-geocryological mapping, geotechnical investigation for construction of trunk pipelines in the permafrost zone. *Engineering survey*, 2014, vol. 4, pp. 42–48. In Rus.
6. Ivanova N.V., Kuznetsova I.L., Rivkin F.M., Sukhodolsky S.E., Chekina V.I. Engineering-geological provision of feasibility study for construction of transcontinental pipelines. *Earth's cryosphere*, 2003, vol. 7, no. 4, pp. 65–75. In Rus.
7. Ershov E.D. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir* [Geocryology of the USSR. Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 454 p.
8. Razumny A.V., Shkatova V.K. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (trete pokolenie). Seriya Zapadno-Sibirskaya. R-44 – Gydanskiy p-ov. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). A Series of West-Siberian. Sheet R-44 – Gydan Peninsula. Explanatory note]. St-Petersburg, Cartographic factory VSEGEI, 2019. 303 p.
9. *Tekhnicheskii otchet po rezul'tatam inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy dlya podgotovki projektov i rabochey dokumentatsii* [Technical report on the results of engineering-geological surveys for the preparation of project and working documentation]. Tyumen, Tyumen NIPIneft Publ., 2013. 368 p.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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 5 March 2020).

14. 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.
15. 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. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012046> (accessed 5 March 2020).
16. 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.
17. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárík M., Kubečka K. Variations in the building site categories in the underground mining region of Doubrava (Czech Republic) for land use planning. *Engineering Geology*, 2011, vol. 122, pp. 169–178.
18. Ullah K.M., Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: Case study dhaka city. *Transactions in GIS*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 20–37.
19. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas», (Central Spanish System, Salamanca, Spain). *Geosciences*, 2013, vol. 1, pp. 46–62.
20. Melnikov E.S. *Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoy gazonosnoy provintsii* [Permafrost conditions of the West Siberian gas-bearing province]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1983. 199 p.
21. Widhalm B., Bartsch A., Leibman M., Khomutov A. Active-layer thickness estimation from X-band SAR backscatter intensity. *The Cryosphere*, 2017, no. 11, pp. 483–496.
22. Cao B., Zhang T., Wu Q., Zhao L., Zou D. Permafrost zonation index map and statistics over the Qinghai-Tibet Plateau based on field evidence. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2019, vol. 30 (3), pp. 178–194.
23. Kemppinen J., Niittynen P., Aalto J., le Roux P.C., Luoto M. Water as a resource, stress and disturbance shaping tundra vegetation. *Oikos*, 2019, vol. 128, no. 6, pp. 811–822.
24. D'Amico M.E., Pintaldi E., Catoni M., Freppaz M., Bonifacio E. Pleistocene periglacial imprinting on polygenetic soils and paleosols in the SW Italian Alps. *Catena*, 2019, vol. 174, pp. 269–284.
25. Rodríguez-Ochoa R., Olarieta J.R., Santana A., Peña-Monné J.L., Sancho C. Relict periglacial soils on Quaternary terraces in the Central Ebro Basin (NE Spain). *Permafrost and Periglacial Processes*, 2019, vol. 30, no. 4, pp. 364–373.
26. Cochand M., Molson J., Lemieux J.-M. Groundwater hydrogeochemistry in permafrost regions, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2019, vol. 30, no. 2, pp. 90–103.

Received: 12 March 2020.

#### Information about the authors

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

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

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

УДК 504.064:550.42

## РТУТЬ В РЯСКЕ КАК ИНДИКАТОР ТЕХНОГЕНЕЗА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Барановская Наталья Владимировна<sup>1</sup>,  
nata@tpu.ru

Барановская Анна Юрьевна<sup>1</sup>,  
kyzmen44@mail.ru

Капитонова Ольга Анатольевна<sup>2</sup>,  
kapoa.tkns@gmail.com

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

<sup>2</sup> Тобольская комплексная научная станция Уральского отделения Российской академии наук,  
Россия, 626152, г. Тобольск, ул. Академика Осипова, 15.

**Актуальность.** Исследования обусловлены необходимостью поиска чувствительных индикаторов техногенеза, элементный состав которых может позволить получить объективную информацию об эколого-геохимической обстановке изучаемой территории. Ртуть отличается высокими токсикологическими свойствами по отношению к живому организму. Использование биообъектов, находящихся в начале пищевой цепочки, является наиболее информативным и объективным, а также может послужить важной информацией для дальнейшего прогнозирования экологической обстановки территории.

**Цель:** определить индикаторные способности элементного состава водных растений семейства рясковые (*Lemnaceae*) к эколого-геохимической обстановке различных урбанизированных территорий России на примере изучения концентраций ртути в ней.

**Объекты:** водное растение семейства рясковые (*Lemnaceae*), отличающееся повсеместной встречаемостью, высокой скоростью прироста биомассы и толерантностью к климатическим условиям окружающей среды.

**Методика.** Исследование проведено по единой методике в 65 населенных пунктах 46 регионов Российской Федерации. Определение валового содержания ртути в ряске проводилось методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

**Результаты.** Рассмотрена роль одного из индикаторов техногенеза – водные растения семейства рясковые. Получены количественные оценки распределения ртути в макрофите на исследуемой территории, определено среднее содержание ртути в ряске по России (среднее медианное – 14,7 нг/г, среднее арифметическое – 18 нг/г). Обнаружены аномальные концентрации ртути в водном растении на территории Ставропольского края, Республик Северная Осетия-Алания и Башкортостан, а также Кировской и Кемеровской областей. Эколого-геохимическая обстановка данных территорий может быть обусловлена влиянием техногенных факторов, наиболее весомыми из которых является хлорно-щелочное производство. Отдельно изучена региональная специфика на примере Томского района Томской области, на территории которого подробно изучена зона влияния Северного промышленного узла.

### Ключевые слова:

Ртуть, растения семейства рясковые (*Lemnaceae*), урбанизированная территория России, Томский район Томской области, геохимический индикатор, природные и техногенные источники ртути.

### Введение

Ртуть относится к высокотоксичным химическим элементам вследствие ее уникальных физико-механических и геохимических свойств, высокой мобильности, разнообразия форм миграции и специфики их трансформации в природных и техногенных средах. Значимым фактором степени роста ртутного загрязнения окружающей среды территорий служат преимущественно промышленные предприятия, которые используют данный экотоксикант в технологических циклах [1–3].

После трагедии, случившейся в префектуре Кумамото в г. Минамата (Япония) в 1956 г., концентрации и поведение ртути и ее соединений в окружающей среде стали иметь санитарно-гигиенический и экологический контроль федерального уровня, изменилась и степень очистки отходов производства, относящихся к I-му классу опасности. Но, несмотря на данную положительную тенденцию в области экологической безопасности ряда стран, актуальность изучения механизмов ртутного загрязнения природных сред становится все выше. Особое внимание уделяется ком-

понентам водной среды, являющимся менее устойчивыми к воздействию ртути [3–6].

Учитывая, что при прохождении по трофическим цепям концентрация металла возрастает в каждом следующем звене, определение экогеохимической обстановки с использованием биообъектов, находящихся в начале пищевой цепочки, является наиболее информативным и объективным, а также может послужить важной информацией для дальнейшего прогнозирования экологической обстановки территории. В настоящее время до конца считается нерешенной основная проблема биогеохимической индикации, а именно поиск биообъекта, отличающегося универсальностью и высокой степенью встречаемости в различных природно-климатических районах.

В настоящий момент большое внимание в области экологического мониторинга, фиторемедиации и биотестирования привлекают свободноплавающие водные растения семейства рясковые (*Lemnaceae*). По сравнению с другими макрофитами ряска отличается рядом преимуществ: простое морфологическое стро-

ение, высокая скорость прироста биомассы, произрастание в различных климатических широтах, чувствительность к эколого-геохимической обстановке окружающей среды [7–9].

Стоит отметить, что L. Shun-Xing [10] в качестве потенциально дешевого адсорбента ртути предложил использовать именно ряску вследствие определения ее высокой адсорбционной способности к поглощению неорганической и органической ртути из водных растворов в лабораторных условиях.

Цель настоящей работы – определение индикаторных способностей водных растений семейства рясковые (*Lemnaceae*) к эколого-геохимической обстановке различных урбанизированных территорий России на примере изучения концентраций ртути в ней.

#### Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлось водное растение семейства рясковые, отличающееся повсеместной

встречаемостью, высокой скоростью прироста биомассы и толерантностью к климатическим условиям окружающей среды [4, 11–13].

Наиболее распространенными видами семейства *Lemnaceae* на территории Российской Федерации являются: *Lemna turionifera* Landolt, *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid., *Lemna minor* L. и *Lemna trisulca* L. [14, 15]. Чаще всего указанные виды произрастают совместно, образуя общие фитоценозы, с большим или меньшим участием каждого вида в каждом конкретном сообществе растительного континуума. В этой связи в работе использована смесь представителей рясковых без разделения их по видам [14].

Полевые исследования проводились во время вегетационного периода макрофитов, с июня по август (с 2013 по 2017 гг.). Отобраны пробы растений семейства рясковых, произраставших на территории 65 населенных пунктов Российской Федерации (рис. 1).



**Рис. 1.** Точки отбора проб ряски на территории Российской Федерации: 1 – г. Калининград, 2 – г. Санкт-Петербург, 3 – д. Вехручей (Респ. Карелия), 4 – г. Вологда, 5 – г. Ярославль, 6 – д. Петушки (Владимирская обл.), 7 – Московская обл. (г. Москва, г. Коломна), 8 – г. Мосальск, 9 – г. Брянск, 10 – г. Орел, 11 – д. Якишино (Тульская обл.), 12 – г. Липецк, 13 – п. Подгоренский (Воронежская обл.), 14 – г. Тамбов, 15 – г. Симферополь, 16 – г. Краснодар, 17 – ст. Нововосободная (Респ. Адыгея), 18 – п. Новая Теберда (Респ. Карачаево-Черкесия), 19 – с. Нижняя Саниба (Респ. Северная Осетия-Алания), 20 – г. Ставрополь, 21 – д. Боталово (Нижегородская обл.), 22 – п. Лесной (Пензенская обл.), 23 – г. Саратов, 24 – п. Знаменский (Респ. Марий Эл), 25 – п. Юган (Респ. Татарстан), 26 – г. Ульяновск, 27 – г. Самара, 28 – г. Оренбург, 29 – г. Сыктывкар, 30 – д. Просница (Кировская обл.), 31 – г. Уфа, 32 – с. Березовка (Пермский край), 33 – г. Магнитогорск, 34 – г. Курган, 35 – г. Тюмень, 36 – г. Нижневартовск, 37 – Томский район (Томская обл.), 38 – г. Новосибирск (Академгородок), 39 – г. Кемерово, 40 – г. Барнаул, 41 – с. Туим (Респ. Хакасия), 42 – г. Иркутск, 43 – г. Улан-Удэ, 44 – г. Якутск, 45 – г. Хабаровск, 46 – г. Петропавловск-Камчатский

**Fig. 1.** Duckweed sampling points in the Russian Federation: 1 – Kaliningrad, 2 – St. Petersburg, 3 – Vekhruchey (Karelia Republic), 4 – Vologda, 5 – Yaroslavl, 6 – Petushki (Vladimir region), 7 – Moscow region (Moscow, Kolomna), 8 – Mosalsk, 9 – Bryansk, 10 – Orel, 11 – Yakshino (Tula region), 12 – Lipetsk, 13 – Podgorensky (Voronezh region), 14 – Tambov, 15 – Simferopol, 16 – Krasnodar, 17 – Novosvobodnaya station (Adygea Republic), 18 – Novaya Teberda (Karachaevo-Cherkessia Republic), 19 – Nizhnyaya Saniba (North Ossetia-Alania Republic), 20 – Stavropol, 21 – Botalovo (Nizhny Novgorod region), 22 – Lesnoy (Penza region), 23 – Saratov, 24 – Znamensky (Mari El Republic), 25 – Yugan (Tatarstan Republic), 26 – Ulyanovsk, 27 – Samara, 28 – Orenburg, 29 – Syktyvkar, 30 – Prosnitsa (Kirov region), 31 – Ufa, 32 – Berezovka (Perm region), 33 – Magnitogorsk, 34 – Kurgan, 35 – Tyumen, 36 – Nizhnevartovsk, 37 – Tomsk district (Tomsk region), 38 – Novosibirsk (Akademgorodok), 39 – Kemerovo, 40 – Barnaul, 41 – Tuim (Khakassia Republic), 42 – Irkutsk, 43 – Ulan-Ude, 44 – Yakutsk, 45 – Khabarovsk, 46 – Petropavlovsk-Kamchatsky

Пробы представителей семейства рясковых отбирали из природных бессточных водоемов, по трофическому состоянию относящихся к эвтрофным, с площадями зеркал преимущественно до 500 м<sup>2</sup>.

Аналитическая пробоподготовка заключалась в проведении родовой идентификации растений, удалении минеральных включений, а также иных видимых невооруженным глазом организмов. Далее пробы растений высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния и гомогенизировались (истирались в агатовой ступке). Видовая идентификация исследуемых растений проведена О.А. Капитановой на базе Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения Российской академии наук.

Определение валового содержания ртути в ряске проводилось методом атомно-абсорбционной спектроскопии в Международном научно-образовательном центре «Урановая геология» Национального исследовательского Томского политехнического университета, в лаборатории микроэлементного анализа на ртутном анализаторе «РА-915+» (Россия) с приставкой «ПИРО-915+». Точность метода ААС подтверждалась использованием государственного стандартного образца состава листа березы ЛБ-1 (ГСО 8923-2007).

#### Результаты исследования и обсуждение

По результатам исследования определено валовое содержание ртути в ряске, произрастающей на территории 65 населенных пунктов России (рис. 2).

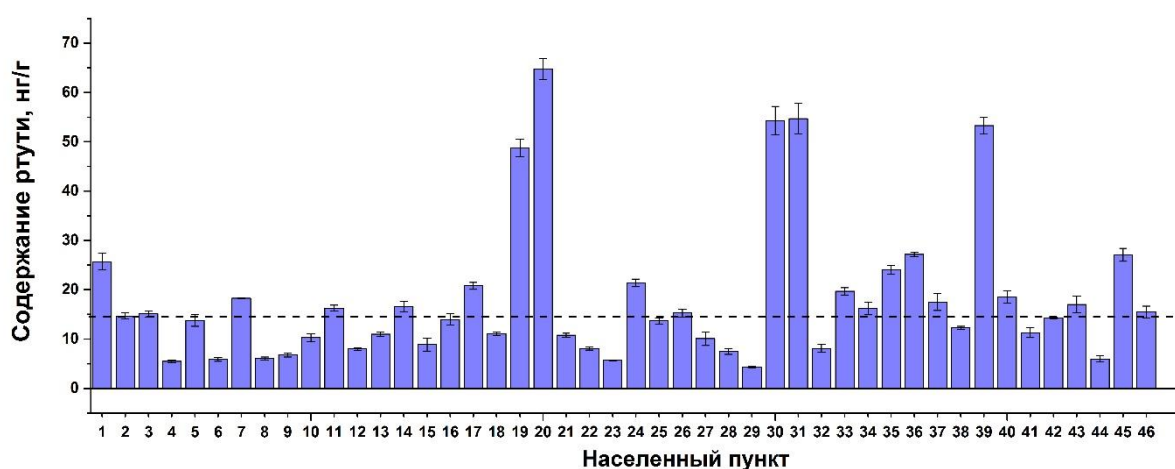


Рис. 2. Содержание ртути в сухом веществе ряски урбанизированных территорий России (пунктирная линия – медианное значение содержания ртути в ряске на территории РФ): Условные обозначения представлены на рис. 1

Fig. 2. Mercury concentration in dry weight of duckweed from the urbanized territories of Russia (dashed line is the average mercury concentration of duckweed for Russian Federation): Symbols are shown in Fig. 1

Выполнена статистическая обработка полученных результатов анализа. Установлено, что распределение ртути в ряске на исследуемой территории статистически значительно отличается от нормального распределения, вследствие чего для оценки среднего взято медианное значение исследуемой выборки.

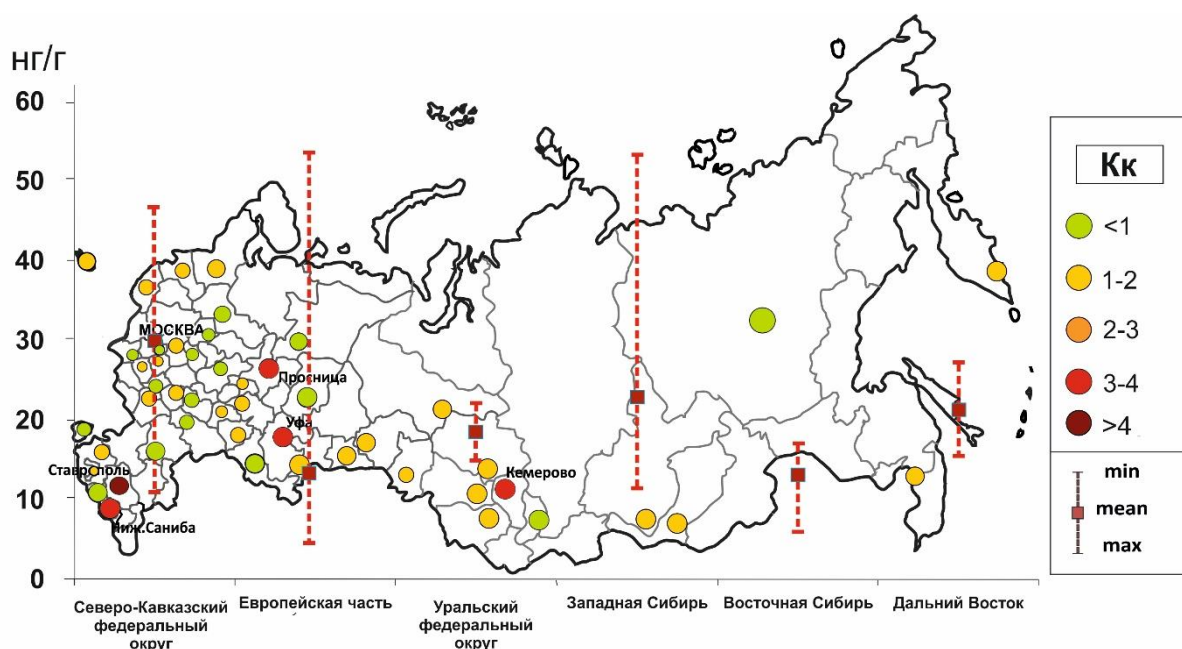
Среднее медианное значение ртути в ряске на территории Российской Федерации составляет 14,7 нг/г, что ниже медианного значения данного экотоксиканта для наземно-воздушных растений, листьев тополя, урбанизированных территорий Сибири и Дальнего Востока, которое составляет 23 нг/г [16]. Среднее арифметическое значение ртути для исследуемой выборки составляет 18 нг/г, что также не превышает фоновых значений ртути для макрофитов (20 нг/г) [17].

По результатам исследования выявлено, что содержание ртути в ряске отличается неоднородностью распределения на исследуемой территории и варьирует в широких пределах: от 4,3 нг/г (г. Сыктывкар) до 64,8 нг/г (г. Ставрополь), что может говорить о высо-

кой степени чувствительности макрофитов к экогеохимической обстановке окружающей среды (рис. 2).

Более 70 % выборки находится в пределах среднего (14,7 нг/г) и ниже. Наименьшие концентрации обнаружены в ряске, произрастающей на территориях д. Петушки (Владимирская обл.) (5,9±0,4 нг/г), г. Мосальска (6,1±0,3 нг/г), г. Вологда (5,5±0,3 нг/г), г. Саратова (5,7±0,1 нг/г), г. Якутска (6±0,6 нг/г) и г. Сыктывкара (4,3±0,1 нг/г) (рис. 2, 3).

Стоит обратить внимание на пробы макрофитов, концентрации ртути в которыхкратно превышают медианное значение по России. Такие повышенные содержания экотоксиканта характерны для следующих территорий: г. Ставрополь (64,8±2,1 нг/г), д. Просница (54,3±2,9 нг/г), с. Нижняя Саниба (48,8±1,8 нг/г), г. Уфа (54,7±3,1 нг/г) и г. Кемерово (53,3±1,7 нг/г) (рис. 2, 3). Данные населенные пункты сконцентрированы преимущественно в западной части страны, в то время как восточная территория отличается содержанием ртути ниже среднего для ряски по России и низкой вариативностью (рис. 3).



**Рис. 3.** Карта-схема коэффициента концентрации ( $K_k$ ) ртути в ряске на территории Российской Федерации относительно среднего медианного значения элемента по выборке

**Fig. 3.** Schematic map of mercury concentration coefficient ( $C_c$ ) in duckweed from the Russian Federation relative to the average median value of the element in the samples

Концентрирование ртути растениями семейства Lemnaceae характерно для субъектов Российской Федерации, в которых сосредоточены крупные производства, в технологических циклах которых используется данный экотоксикант и с выбросами поступает в окружающую среду (рис. 1) [1, 2, 18].

Ярким примером влияния техногенеза могут быть аномально высокие концентрации ртути в ряске ( $54,3 \pm 2,9$  нг/г), произраставшей в заводе р. Просница, Кировской области. Эколого-геохимическая ситуация данного района сформировалась вследствие воздействия ОАО «Кирово-Чепецкого химкомбината», в технологии которого для производства хлора и каустической соды используется ртутный электрод [19]. Наши данные подтверждаются ранее проведенными на этой территории исследованиями других авторов по изучению содержания ртути в различных компонентах природной среды. Так, по данным С.Г. Скугоровой [19], Т.А. Мусихиной [20, 21], в районе р. Елховки и ее притоков (к которым относится р. Просница и ее акватория) Кировской области обнаружены концентрации ртути в различных природных компонентах, кратно превышающие фоновые значения для данного района. По некоторым данным, предприятие имеет проблему, связанную с высоким уровнем грунтовых вод в районе расположения корпуса электролиза, вследствие чего возможно загрязнение близкорасположенных к предприятию поверхностных вод [2].

Аномальные концентрации ртути в ряске на территории г. Кемерово ( $53,3 \pm 3,2$  нг/г) могут говорить об эколого-геохимической ситуации района, сложившейся вследствие влияния природного и техногенного факторов. Ввиду наличия крупнейшего каменноугольного бассейна районы Кузбасса определяются различными отраслями промышленности (горнодо-

бывающая, горнообрабатывающая, химическая, металлургическая и т. д.). Одним из крупных промышленных центров Кемеровской области является г. Кемерово – центр химического производства.

Выявленные высокие концентрации ртути в макрофитах на данной территории могут быть следствием высокой развитости углехимической промышленности района.

По данным некоторых авторов, повышенные содержания ртути в почвах ( $0,06$ – $0,20$  мг/кг) зарегистрированы в районах активной угледобычи и в крупных промышленных центрах Кемеровской области. Стоит отметить, что наиболее высокие концентрации экотоксиканта обнаружены именно в верхнем горизонте, содержащем высокую концентрацию подвижных компонентов и тесно взаимодействующим с поверхностными водами ( $0,09$ – $0,37$  мг/кг) [22].

В отношении регионального характера распределения ртути в ряске наиболее подробно изучена территория Томского района Томской области, которая характеризуется крайне неравномерным распределением промышленных объектов, с сосредоточением основных крупных предприятий именно в Томском районе [23, 24].

Среднее содержание ртути в ряске на территории Томского района соответствует среднероссийским показателям (18 нг/г) и не превышает фоновых значений для макрофитов. При этом наблюдаются локальные участки, где содержание ртути значительно превышает фон (20 % от всей выборки). К ним относятся такие населенные пункты, как: д. Георгиевка ( $34,1 \pm 2,8$  нг/г), д. Надежда ( $30,5 \pm 2,8$  нг/г), с. Наумовка ( $27,9 \pm 1,8$  нг/г), п. Кузовлево ( $29,9 \pm 1,1$  нг/г).

Данные населенные пункты включают преимущественно водоемы, расположенные в основной розе



ветров в летний сезон (с юго-юго-запада на северо-северо-восток), непосредственно прилегающие к г. Томску и находящиеся в 30-километровой зоне влияния предприятий Северного промышленного узла города Томска (СПУ), в состав которого входит комплекс из более чем 33 разнопрофильных объектов, в том числе крупнейшие комплексы Сибирского химического комбината и ООО «Томскнефтехим» (ныне «СИБУР»). Эта территория характеризуется специфической эколого-геохимической ситуацией ртутного загрязнения, сформировавшейся вследствие длительного воздействия СПУ [23, 24].

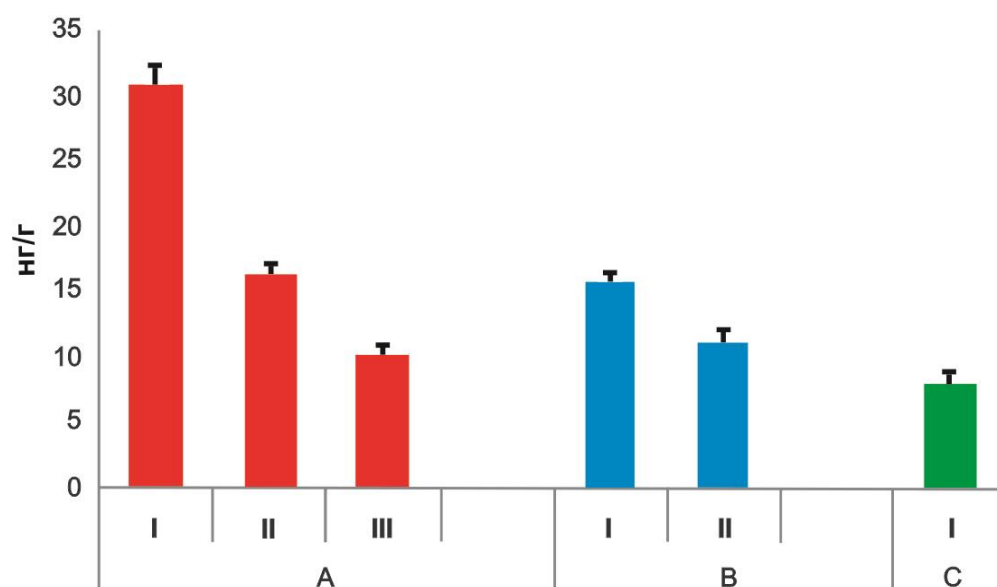
Наши данные показали, что по содержанию ртути в растениях семейства рясковые территорию Томского района можно разделить на три характерные группы.

К первой группе (группа А) относятся населенные пункты, расположенные по преобладающей розе ветров и находящиеся в зоне воздействия предприятий

СПУ. Ряска, произрастающая в данных поселениях, характеризуется наиболее высоким содержанием ртути (до 34 нг/г). Также стоит отметить, что концентрация экотоксиканта возрастает по мере приближения к источнику воздействия.

Ко второй группе (группе В) относятся населенные пункты, расположенные в Томь-Обском междуречье и вдоль реки Томь. Среднее содержание ртути в исследуемом растении составляет 16 нг/г. Мы предполагаем, что причиной сложившейся эколого-геохимической ситуации для населенных пунктов второй группы является трансграничный перенос поллютантов вдоль реки с территории Кузбасса (Кемеровская область).

Третья группа (группа С) представляет собой поселения Томского района, расположенные на значительном расстоянии от основных объектов техногенного воздействия (юг и юго-запад района), концентрации ртути здесь не превышают 10 нг/г (рис. 4).



**Рис. 4.** Содержание ртути в ряске на территории Томского района (сухое вещество, нг/г). Населенные пункты сгруппированы по направлениям: А – северо-восток (I – д. Георгиевка, д. Надежда, с. Наумовка, п. Кузовлево, II – Малиновка, III – п. Светлый, п. Копылово); В – северо-запад (I – с. Моряковский Затон, п. Самусь, II – п. Победа); С – юго-восток (д. Лоскутово)

**Fig. 4.** Mercury concentration in duckweed from the Tomsk region. Settlements are grouped as: A – north-east (I – Georgievka, Nadezhda, Naumovka, Kuzovlevo, II – Malinovka, III – Svetly, Kopylovo); B – north-west (I – Mor-yakovsky Zaton, Samus, II – Pobeda); C – south-east (Loskutovo)

Таким образом, полученные данные могли констатировать тот факт, что растения семейства рясковые являются чувствительным индикаторным объектом.

#### Заключение

В результате проведенных исследований получена информация о среднем содержании ртути в пресноводных растениях семейства рясковых (Lemnaceae) на территории России (среднее медианное – 14,7 нг/г, среднее арифметическое – 18 нг/г). Наименьшие значения ртути обнаружены в ряске, произрастающей на урбанизированных территориях Владимирской, Вологодской, Саратовской областей, Республик Якутия и Коми.

Концентрации ртути в ряске, произрастающей на территории Ставропольского края, Республик Северная Осетия-Алания и Башкортостан, а также Кировской и Кемеровской областей, имеют аномальные значения и преимущественно определены влиянием техногенных факторов. Можно предположить, что обнаруженная эколого-геохимическая обстановка на территории Республики Башкортостан и Кировской области имеет одинаковую природу, сложившуюся вследствие влияния хлорно-щелочного производства. По результатам степени концентрирования ртути в ряске можно выделить следующие потенциальные источники экотоксиканта: химические заводы по производству каустической соды и хлора ртутным методом, углехими-

ческая промышленность, а также зоны, отличающиеся высокой частотой встречаемости крупных техногенных объектов на локальной территории.

Степень воздействия промышленных объектов на концентрирование ртути ряской ярко продемонстрированы на территории Томской области, Томского района. Участки с высоким содержанием поллютанта в ряске сконцентрированы в зоне, характеризующейся наибольшим техногенным прессингом, также наблюдается увеличение концентраций ртути по мере приближения к источнику загрязнения.

Таким образом, полученные результаты позволили выявить высокую чувствительность исследуемого биообъекта к ртути в окружающей среде, при этом аномальные концентрации экотоксиканта в ряске могут сигнализировать о воздействии именно антропогенного источника. Учитывая повсеместную встречаемость растений семейства рясковых и при дальнейшем проведении ряда исследований по определению механизмов накопления ртути в ней, данный объект возможно использовать как универсальный индикатор ртутного загрязнения окружающей среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янин Е.П. Ртуть в России: производство и потребление. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 38 с.
2. Pollman C.D., Rumbold D.G., Axelrad D.M. Mercury and the Everglades. A Synthesis and Model for Complex Ecosystem Restoration. – Cham: Springer, 2019. – 109 p.
3. Paulson A.J., Marvin-DiPasquale M.C., Moran P.W., Stewart A.R., DeWild J.F., Toft J., Agee J.L., Kakouros E., Kieu Le H., Carter B., Sheibley R.W., Cordell J., Krabbenhoft D.P. Mercury methylation and bioaccumulation in Sinclair Inlet, Kitsap County, Washington: U.S. – Reston: U.S. Geological Survey, 2018. – 63 p.
4. Wollenberg J.L., Peters S.C. Diminished mercury emission from waters with duckweed cover // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2009. – V. 114. – № G2. – P. 1–10.
5. Wang R., Wang P., Wang C. Mercury distribution, speciation and potential ecological risk assessment in sediments from Lake Taihu, China // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2018. – V. 100. – № 4. – P. 425–439.
6. Иванов А.Ю. Закономерности распределения химических элементов в вертикальном профиле донных отложений слабопроточных водоемов Томского района // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 88–101.
7. Phytoremediation performance of Lemna communities in a constructed wetland system for wastewater treatment / S. Ceschin, V. Sgambato, N.T.W. Ellwood, V. Zuccarello // *Environmental and experimental botany*. – 2019. – V. 162. – P. 67–71.
8. Ziegler P., Sree K.S., Appenroth K.J. Duckweed biomarkers for identifying toxic water contaminants? // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – V. 26. – № 15. – P. 14797–14822.
9. Uranium biosorption by Lemna sp. and Pistia stratiotes / L.C. Vieira, L.G. Araujo, R.V.P. Ferreira, E.A. Silva, R.L.S. Canevesi, J.T. Marumoa // *Journal of environmental radioactivity*. – 2019. – V. 203. – P. 179–186.
10. Thorough removal of inorganic and organic mercury from aqueous solutions by adsorption on Lemna minor powder / L. Shun-Xing, Z. Feng-Ying, H. Yang, N.J. Jian-Cong // *Hazardous Materials*. – 2011. – V. 186. – P. 423–429.
11. Varga M., Horvatic J., Celic A. Short term exposure of Lemna minor and Lemna gibba to mercury, cadmium and chromium // *Central European Journal of Biology*. – 2013. – V. 8. – № 11. – P. 1083–1093.
12. Duckweed as human food. The influence of meal context and information on duckweed acceptability of Dutch consumers / M.F.A. de Beukelaar, G.G. Zeinstra, J.J. Mes, A.R.H. Fischer // *Food quality and preference*. – 2019. – V. 71. – P. 76–86.
13. Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. The accumulation of La, Ce and Y by Lemna minor and Lemna gibba in the Keban gallery water, Elazig Turkey // *Water and Environment Journal*. – 2018. – V. 32. – № 1. – P. 75–83.
14. Bökük H., Yakar A., Türker O.C. Assessment of Lemna gibba L.(duckweed) as a potential ecological indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent // *Ecological indicators*. – 2013. – V. 29. – P. 538–548.
15. Капитонова О.А. Материалы к биологии и экологии рясковых (Lemnaceae) Сибири // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. – 2019. – V. 1. – № 18. – С. 127–131.
16. Ртуть в листьях тополя на урбанизированных территориях Юга Сибири и Дальнего Востока / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, Е.Е. Ляпина, Е.М. Турсуналиева, Н.В. Барановская, Н.А. Осипова // *Экология и промышленность России*. – 2018. – Т. 22. – № 12. – С. 56–62.
17. Никаноров А.М., Жулидов А.В., Покаржевский А.Д. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 144 с.
18. Estimating chemical footprint: contamination with mercury and its compounds / N. Tarasova, A. Makarova, P. Fantke, P. Shlyakhov // *Pure and Applied Chemistry*. – 2018. – V. 90. – № 5. – P. 857–868.
19. Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я. Содержание ртути в компонентах природной среды на территории вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината // *Известия Коми научного центра УРО РАН*. – 2012. – Т. 11. – № 3. – С. 39–45.
20. Влияние выпусков промышленных стоков на формирование химического состава водотоков в границах территории Кирово-Чепецкой природно-техногенной системы / Т.А. Мусихина, Ю.А. Гарюгин, Е.А. Земцова, С.А. Казинков // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2015. – Т. 17. – № 6. – С. 123–127.
21. Эбериль В.И., Трегер Ю.А. Выбросы ртути с предприятий, производящих хлор и каустик в России // *Химическая промышленность сегодня*. – 2005. – № 1. – С. 32–38.
22. Маликова И.Н., Аношин Г.Н., Бадмаева Ж.О. Подвижные формы ртути в почвах природных и природно-техногенных ландшафтов // *Геология и геофизика*. – 2011. – Т. 52. – № 3. – С. 409–425.
23. Адам А.М. Экология Северного промышленного узла г. Томска. Проблемы и решения. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 260 с.
24. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Ю.И. Сухих, Н.В. Барановская, В.Т. Волков, Н.Н. Волкова, В.В. Архангельский, Т.А. Архангельская, О.А. Денисова, А.Ю. Шатилов, Е.П. Янкович. – Томск: Курсив, 2006. – 216 с.

Поступила 17.06.2020 г.



#### **Информация об авторах**

**Барановская Н.В.**, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Барановская А.Ю.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Капитонова О.А.**, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник группы экологии живых организмов Отдела экологических исследований Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения Российской академии наук.

UDC 504.064:550.42

## MERCURY IN DUCKWEED AS AN INDICATOR OF TECHNOGENESIS IN RUSSIA

Natalya V. Baranovskaya<sup>1</sup>,  
kyzmen44@mail.ru

Anna Yu. Baranovskaya<sup>1</sup>,  
nata@tpu.ru

Olga A. Kapitonova<sup>2</sup>,  
kapoa.tkns@gmail.com

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

<sup>2</sup> Tobolsk Complex Scientific Station of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,  
15, Academician Osipov street, Tobolsk, 626152, Russia.

**Relevance.** The studies are determined by the need to find the sensitive technogenesis indicators, which elemental composition can show the ecological and geochemical situation of the territory. Mercury have negative toxicological influence on living organism. Biological objects at the beginning of food chain could be informative and objective indicators of environmental situation and can have important information for further predictions.

**The aim** of the research is to determine the indicator abilities of Lemnaceae family aquatic plants to the ecological and geochemical situation of various urbanized territories in Russia by studying concentration of mercury.

**Objects:** an aquatic plant of the duckweed family (Lemnaceae), characterized by widespread occurrence, high biomass growth rate and tolerance to climatic environmental conditions.

**Methodology.** The study was carried out according to a single methodology in 65 settlements from 46 regions of the Russian Federation. The determination of gross mercury in duckweed was carried out by atomic absorption spectrometry.

**Results.** The role of aquatic plant of the duckweed family as a geo-indicator of technogenesis is considered. The distribution of mercury in macrophyte from the study area was discovered, the average mercury content in duckweed for Russia (average median – 14,7 ng/g, arithmetic average – 18 ng/g) was calculated. The abnormally high concentrations of mercury were determined in an aquatic plant from the Stavropol Krai, the Republic of North Ossetia-Alania and Bashkortostan, Kirov and Kemerovo Regions. The ecological and geochemical situation in these territories may be influenced by technogenic factors, such as chlorine-hydroxide production. The regional specificity of the Tomsk region were studied individually. The influence of the Northern industrial zone was particularly studied there.

#### Key words:

Mercury, duckweed, urbanized territory of Russia, Tomsk region, geochemical indicator, natural and technogenic sources of mercury.

The authors thank and express special appreciation for the recommendations and irreplaceable advice to the Professor L.P. Rikhvanov, N.A. Osipova and E.E. Lyapina for help in performing atomic-absorption analysis and for all those who helped in collecting material disinterestedly: N. Struk (Voronezh), D.R. Karimov (Bor), A.V. Tarasov (Kolomna), K. Fedosova (Moscow), A.A. Zorina (Kirovo-Chepetsk), D.S. Denisova (Oryol), F. Marushchak (Moscow), E.A. Monakhova (Omsk), N.V. Torgovkin (Yakutsk), A.O. Soroka and O.V. Soroka (Taishet), A.A. Shilenina (Biysk), N. Shangin (St. Petersburg), E.E. Mikhailova (Yekaterinburg), P.S. Shatiyf (Partizansk), A. Kondratyeva (Pskov), E.A. Mekhantsev (Novosibirsk), Z.V. Dzutsev (Vladikavkaz), A.G. Vorobyeva (Vladimir), O.V. Martynova and her students (Mosalsk) and others.

#### REFERENCES

1. Yanin E.P. *Rtut v Rossii: proizvodstvo i potreblenie* [Mercury in Russia: production and consumption]. Moscow, IMGRE Publ., 2004. – 38 p.
2. Pollman C.D., Rumbold D.G., Axelrad D.M. Mercury and the Everglades. *A Synthesis and Model for Complex Ecosystem Restoration*. Cham, Springer, 2019. 109 p.
3. Paulson A.J., Marvin-DiPasquale M.C., Moran P.W., Stewart A.R., DeWild J.F., Toft J., Agee J.L., Kakouros E., Kieu Le H., Carter B., Sheibley R.W., Cordell J., Krabbenhoft D.P. *Mercury methylation and bioaccumulation in Sinclair Inlet, Kitsap County*. Washington: U.S. Reston, U.S. Geological Survey, 2018. 63 p.
4. Wollenberg, J.L., Peters S.C. Diminished mercury emission from waters with duckweed cover. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, vol. 114, no. G2, pp. 1–10.
5. Wang R., Wang P., Wang C. Mercury distribution, speciation and potential ecological risk assessment in sediments from Lake Taihu, China. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2018, vol. 100, no. 4, pp. 425–439.
6. Ivanov A.Yu. Patterns of the distribution of chemical elements in the vertical profile of bottom sediments of low-flow reservoirs of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2. pp. 88–101. In Rus.
7. Ceschin S., Sgambato V., Ellwood N.T.W., Zuccarello V. Phytoremediation performance of Lemna communities in a constructed wetland system for wastewater treatment. *Environmental and experimental botany*, 2019, vol. 162, pp. 67–71.
8. Ziegler P., Sree K.S., Appenroth K.J. Duckweed biomarkers for identifying toxic water contaminants? *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no. 15, pp. 14797–14822.
9. Vieira L.C., Araujo L.G., Ferreira R.V.P., Silva E.A., Canevesi R.L.S., Marumoa J.T. Uranium biosorption by Lemna sp. and Pistia stratiotes. *Journal of environmental radioactivity*, 2019, vol. 203, pp. 179–186.
10. Shun-Xing L., Feng-Ying Z., Yang H., Jian-Cong N.J. Thorough removal of inorganic and organic mercury from aqueous solutions by adsorption on Lemna minor. *Hazardous Materials*, 2011, vol. 186, pp. 423–429.
11. Varga M., Horvatic J., Celic A. Short term exposure of Lemna minor and Lemna gibba to mercury, cadmium and chromium. *Central European Journal of Biology*, 2013, vol. 8, no. 11, pp. 1083–1093.

12. Beukelaar M.F.A., Zeinstra G.G., Mes J.J., Fischer A.R.H. Duckweed as human food. The influence of meal context and information on duckweed acceptability of Dutch consumers. *Food quality and preference*, 2019, vol. 71, pp. 76–86.
13. Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. The accumulation of La, Ce and Y by Lemna minor and Lemna gibba in the Keban gallery water, Elazig. *Water and Environment Journal*, 2018, vol. 32, no. 1, pp. 75–83.
14. Böcük H., Yakar A., Türker O.C. Assessment of Lemna gibba L. (duckweed) as a potential ecological indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent. *Ecological indicators*, 2013, vol. 29, pp. 538–548.
15. Kapitonova O.A. Materialy k biologii i ekologii ryaskovykh (Lemnaceae) Sibiri Materials about biology and ecology of duckweed (Lemnaceae) of Siberia. *Botanical problems of Southern Siberia and Mongolia*, 2019, vol. 1, no. 18, pp. 127–131. In Rus.
16. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Robertus Yu.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M., Baranovskaya N.V., Osipova N.A.. Mercury in Poplar Leaves in the Urbanized Areas of Southern Siberia and the Far East. *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 12, pp. 56–62. In Rus.
17. Nikanorov A.M., Zhulidov A.V., Pokarzhevsky A.D. *Biomonitoring tyazhelykh metallov v presnovodnykh ekosistemakh* [Biomonitoring of heavy metals in freshwater ecosystems], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 144 p.
18. Tarasova N., Makarova A., Fantke P., Shlyakhov P. Estimating chemical footprint: contamination with mercury and its compounds. *Pure and Applied Chemistry*, 2018, vol. 90, no. 5, pp. 857–868.
19. Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya. The mercury content in the components of the environment in the territory near the Kirov-Chepetsk chemical plant. *Bulletin of the Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 11, no. 3, pp. 39–45. In Rus.
20. Musikhina T.A., Garyugin Yu.A., Zemtsova E.A., Kazienkov S.A. The effect of industrial effluent releases on the formation of the chemical composition of watercourses within the boundaries of the Kirov-Chepetsk natural-technogenic system. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 17, no. 6, pp. 123–127. In Rus.
21. Eberil V.I., Treger Yu.A. Mercury emissions from enterprises producing chlorine and caustic in Russia [Mercury emissions from enterprises producing chlorine and caustic in Russia]. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*, 2005, no. 1, pp. 32–38.
22. Osipova N.A., Bykov A.A., Talovskaya A.V., Nikolaenko A.N., Yazikov E.G., Larin S.A. The influence of coal mining enterprises on the pollution of the snow cover of the adjacent urban areas (for example, Mezhdurechensk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 36–46. In Rus.
23. Adam A.M. *Ekologiya Severnogo promyshlennogo uzla g. Tomsk. Problemy i resheniya* [Ecology of the Northern industrial hub of Tomsk. Problems and solutions]. Tomsk, TSU Publ. House, 1994. 260 p.
24. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Sukhikh Yu.I., Baranovskaya N.V., Volkov V.T., Volkova N.N., Arkhangelsky V.V., Arkhangelskaya T.A., Denisova O.A., Shatilov A.Yu., Yankovich E.P. *Ekologo-geokhimicheskie osobennosti prirodnykh sred Tomskogo rayona i zaboлеваemost* [Ecological and geochemical features of the natural environment of the Tomsk region and the incidence]. Tomsk, Kursiv Publ., 2006. 216 p.

Received: 17 June 2020.

#### Information about the authors

**Natalya V. Baranovskaya**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Anna Yu. Baranovskaya**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Olga A. Kapitonova**, Cand. Sc., associate professor, Tobolsk Complex Scientific Station of Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 504.55.054: 622 (470.6)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫЕМКИ РУД В ПРЕДЕЛАХ РУДНОГО ПОЛЯ

Голик Владимир Иванович<sup>1,2</sup>,  
v.i.golik@mail.ru

Лукьянов Виктор Григорьевич<sup>3</sup>,  
lukyanov@tpu.ru

Качурин Николай Михайлович<sup>4</sup>,  
ecology\_tsu\_tula@mail.ru

Стась Галина Викторовна<sup>4</sup>,  
galina\_stas@mail.ru

<sup>1</sup> Владикавказский научный центр РАН,  
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

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

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>4</sup> Тульский государственный университет,  
Россия, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92.

**Актуальность исследования.** Статья посвящена актуальной проблеме совершенствования технологии разработки сложно-структурных месторождений скального типа для увеличения производства содержащихся в рудах редких и ценных металлов, дефицитность которых возрастает с развитием научно-технического прогресса.

**Цель исследования** – определение условий совмещения систем разработки разных классов для увеличения возможностей селективизации добычных работ при использовании различных вариантов извлечения руд в смежных добычных участках.

**Методика исследования.** Основу исследования составляет экономический расчет возможных вариантов совмещения в пределах рудного поля на основе полученных экспериментально сведений о рудовмещающем массиве.

**Результаты.** Дана характеристика условий залегания руд на конкретном скальном месторождении сложной структуры. Произведено инженерно-геологическое районирование рудовмещающего массива с дифференцированной оценкой геолого-структурных нарушений по величине и направленности. Дан прогноз возможного по аналогии с практикой поведения горных выработок под влиянием разломных структур и макротрещин. На уровне экспертной оценки определена целесообразность применения слоевой или камерной систем разработки с закладкой технологических пустот твердеющими смесями.

**Выводы.** Эффективность выемки руд достигается селективизацией выемки запасов в пределах одного рудного поля при комбинировании систем разработки при максимальном учете геолого-структурных факторов локализации руд и механических свойств рудовмещающих пород.

### Ключевые слова:

Рудное тело, технология разработки, геологические условия, закладочная смесь, экономический расчет, оптимизация.

### Введение

Состояние горнодобывающей отрасли характеризуется ухудшением технико-экономических показателей освоения недр, в первую очередь, за счет снижения качества добываемых минеральных ресурсов [1–4].

Значительная доля металлических руд добывается из рудных тел, которые отличаются резкими изменениями мощности, угла падения и прочих параметров. Месторождения чаще всего представляют собой изометрическую залежь в породах различного возраста. Участки с повышенным содержанием металла в рудах чередуются с бедными участками. Месторождения рассматриваемого типа чаще всего разрабатываются технологиями с валовой выемкой при геометризации выемочных участков.

Управление горным давлением осуществляется путем оставления целиков, что повышает величину напряжений в массиве, поэтому основным направлением повышения эффективности разработки является применение вариантов сплошной выемки рудного тела.

Сложноструктурные месторождения отличаются системами разломов и трещин, что придает рудовмещающим массивам свойства дискретной среды. Актуальность совершенствования технологии разработки таких месторождений повышается тем, что в них чаще всего локализованы дефицитные редкоземельные, благородные и цветные металлы.

В соответствии с работами М.М. Протоdjяконова, В.Д. Слесарева, С.В. Ветрова и др., скальные массивы сохраняют устойчивость при обнажении за счет естественного самозаклинивания структурных блоков.

Исторически самым ранним способом добычи руд является селективная выемка выработками по руде с открытым выработанным пространством. С появлением средств массового разрушения пород получили развитие технологии с валовой выемкой геометризованных участков. В середине прошлого века появилась технология с закладкой технологических пустот твердеющими смесями [5–8].

Появление высокопроизводительной горной техники и ужесточение требований к полноте выемки руд способствуют селективизации отработки запасов, что породило проблему комбинирования систем разработки в пределах одного рудного поля по экономическому критерию.

Целью работ рассматриваемого направления горного дела является повышение эффективности выемки руд с использованием резервов, одним из которых является оптимизация параметров комбинированной выемки запасов в пределах одного рудного поля [9–11].

#### Методика исследования

Инженерно-геологические исследования в стадии детальной разведки месторождения включают:

- выделение типов пород с определением физико-механических свойств;
- анализ разломной и трещинной структуры массива;
- изучение ослабленности пород в массиве;
- проведение электрометрического каротажа;
- анализ состояния выработок;
- инженерно-геологическое районирование месторождения;
- прогноз устойчивости горно-подготовительных и очистных выработок;
- рекомендации по выбору систем разработки месторождения.

#### Результаты

Участок месторождения «Глубинное» (Северный Казахстан) приурочен к зоне регионального субширотного разлома, располагается в южном крыле девонского вулканогенно-терригенного прогиба и вытягивается вдоль разлома на 2 км.

Зона субширотного разлома разделяет массив на геологические блоки.

Южный блок сложен андезитовыми порфиритами и туфами, прорванными интрузиями порфиритов. Породы характеризуются пропилитизацией и хлоритизацией и смяты в складки с углами падения 70–75°.

Северный и Центральный блоки сложены осадочно-вулканогенными породами, причем нижнедевонские отложения разделены на верхнюю эффузивную и нижнюю осадочно-туфогенную подсвиты. Породы верхней подсвиты – дацитовые и трахидацитовые порфиры и их кластолавы. Нижняя подсвита представлена туфопесчаниками, алевролитами, туффитами и туфами кислого состава с преобладанием мугфлов дацитовых порфиров. Суммарная мощность пород нижней подсвиты 70–400 м. В северном, восточном и западном направлениях мощность подсвиты увеличивается до 500–700 м.

Центральный блок шириной 100–150 м сложен туфами дацитовых порфиров, которые залегают на порфиритах ордовика и прорываются диабазовыми порфиритами. Породы интенсивно поддроблены, альбитизированы и падают под углом 30–60°.

Зона регионального Широкого разлома представлена серией северо-западных тектонических нарушений, которые вскрыты разведочными выработками в полосе шириной 120–150 м. Наиболее крупными являются крутопадающие Северный и Южный разломы и наклонный Диагональный разлом.

К зоне регионального разлома приурочено развитие карбонатно-натрового метасоматоза (эйситизация). Зона метасоматоза разделяется на внешнюю кальцит-альбитовую с хлоритом и внутреннюю рудную гематит-альбитовую. Внешняя зона захватывает породы Центрального блока, заходя в Южный блок.

Внутренняя зона метасоматитов образует рудные тела. Это оруденелые альбититы по туфам кислого состава, реже по диабазовым порфиритам. Рудные тела располагаются в полосе шириной 50–100 м и вытянутой на 2,0 км. Глубина верхней границы руды 250 м, нижней 730 м. Контакты рудных тел нечеткие. Ширина забалансовых оторочек от 0 до 5 м, чаще 1–2 м. Оруденение прерывистое. В контуры рудных тел включены прослои пород и некондиционных руд мощностью от 1,5 до 5 м. Коэффициент рудоносности для запасов, разведанных по категории С1, колеблется от 0,51 до 0,83, составляя в среднем 0,74.

Рудные тела группируются в рудные зоны. Зоны 1, 2 и 4 в центральной части месторождения внутри Центрального блока крутопадающие линзо- и штокеркообразные рудные тела мощностью от 3–5 до 30–50 м при средней мощности 5–10 и 10–30 м. Вертикальный размер зоны оруденения в них – от 100 до 250 м.

В зоне 1 сконцентрировано около 70 % запасов, в зоне 2 – 5 %, в зоне 4 – 3 %. Рудная зона 3 локализуется в Южном блоке в лежачем крыле Южного разлома. Это жило- и линзообразные крутопадающие тела мощностью от 1 до 45 м, при средней мощности 5–15 м, вмещающие 10 % запасов месторождения.

На восточном фланге месторождения, в зоне регионального широтного разлома, размещены 5–7 рудные зоны, представленные кулисообразными линзами мощностью до 10 м при средней мощности в первые метры. В них сосредоточено примерно 5 % запасов полезного компонента.

С учетом особенностей геологического строения месторождения произведено инженерно-геологическое районирование массива.

Северный, Центральный и Южный тектонические блоки различаются развитием комплексов пород, напряженностью разломной тектоники, характером и интенсивностью макротрещиноватости пород и ослабленностью пород.

В качестве инженерно-геологических элементов выделяются зоны разломов I и II порядков, разграничивающие районы и участки; зоны влияния разломов I и II порядков в их крыльях; зоны сопряжения разломов I и II порядков; внутренние средне-нарушенные и средне-ослабленные части тектонических блоков; зоны внутриблоковых мелких разломов.

По инженерно-геологическим условиям месторождение относится к месторождениям средней сложности, приближаясь к простым.

Горные выработки могут разрушаться в неустойчивых породах зон разломов. Их устойчивость ухудшают породы зон влияния разломов, а также сопряжения крупных макротрещин, особенно при расположении выработок вдоль структурных элементов. Возможный устойчивый пролет очистных выработок в малоустойчивых породах не превышает 7–8 м.

Большая часть руд месторождения представляет собой прочные (100–150 МПа), среднеослабленные

( $K_0=0,25$ ), среднеустойчивые оруденелые альбититы с горизонтальными размерами структурных блоков в 3–4 м. Устойчивый пролет очистных выработок экспертно может быть оценен в 15–20 м.

По этим соображениям часть рудных тел целесообразно обрабатывать слоевой системой разработки, а часть – камерной.

Технико-экономическое обоснование систем разработки проведено для рудных зон Р-1 и Р-2, разведанных по категории  $C_1$  и содержащих около половины балансовых запасов месторождения, путем сравнения альтернативных вариантов систем разработки (табл. 1).

**Таблица 1.** Показатели вариантов систем разработки

**Table 1.** Indicators of development system options

Вариант Option	Горизонтальные слои с закладкой Bookmark horizontal layers	Подэтажные орты с закладкой Bookmarked unit vectors	Магазинирование Shopping	Потери, % Loss, %	Разубоживание, % Dilution, %
I	96	0	4	4	15
II	13	83	4	6	24
III	49	47	4	5	18

Рудные тела Р-1-I и Р-2-(I, 2) из-за низкой устойчивости пород и руд обрабатываются слоевой системой разработки с нисходящей выемкой, а рудное тело Р-1-3 при мощности рудного тела 2–5 м, крутом падении и устойчивых вмещающих породах – с магазинированием руды.

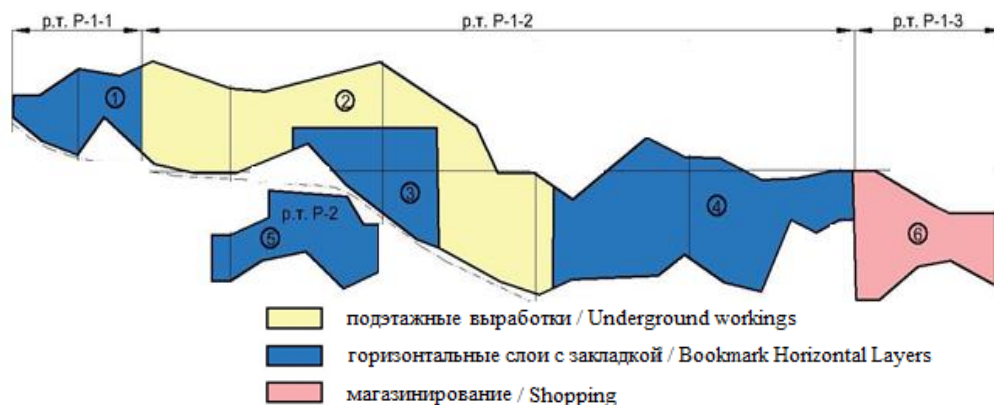
По варианту I рудное тело Р-1-2 (83 % запасов рудных зон Р-I и Р-2) обрабатывается слоевой системой разработки, по варианту II – системой подэтажных ортов (штреков), по варианту III – комбинированно – системой разработки с магазинированием руды на участках с высоким коэффициентом рудоносности –

системой подэтажных ортов (штреков), участки с низким коэффициентом рудоносности – слоевой системой разработки. Удельный вес систем в варианте III выбран так, чтобы разубоживание не превышало 20 %.

Проекция рудных зон Р-I и Р-2 на вертикальную плоскость с выделением участков, обрабатываемых системами разработки по варианту III дана на рисунке.

Расчетные показатели обработки участков приведены в табл. 2.

Исходные данные для сравнения вариантов систем разработки сведены в табл. 3.



**Рисунок.** Расположение выемочных участков рудного поля

**Figure.** Location of excavation sites of the ore field

**Таблица 2.** Варианты отработки выемочных участков

**Table 2.** Excavation mining options

№ участка Plot number	Доля запасов Stock share	Возможные Варианты Possible options	Разубоживание/Dilution, %			Потери/Loss, %		
			слои layers	камеры cameras	магазин score	слои layers	камеры layers	магазин score
1	4	слои/layers	18	–	–	4	–	–
2	47	слои, камеры layers, cameras	13	19	–	4	6	–
3	18	слои, камеры layers, cameras	12	28	–	4	6	–
4	18	слои, камеры layers, cameras	19	31	–	4	6	–
5	9	слои/layers	21	–	–	4	–	–
6	4	магазин/score	–	–	23	–	–	6

**Таблица 3.** Показатели вариантов систем разработки

**Table 3.** Indicators of development system options

Показатели/Indicators	Единицы Units	Варианты/Options		
		I	II	III
Доля в запасах/Share in stocks:				
Слои/Layers	%	100	—	44
Подэтажные выработки/Sub-floor workings	%	—	100	56
Потери/Losses	%	4	6	5
Разубоживание/Dilution	%	14	24	17
Доля нарезных и очистных выработок Share of grooved and stope workings	м³/т m³/t	0,5	0,5	0,5
Доля подготовительных выработок Share of preparatory workings	м³/м³ m³/m³	0,11	0,05	0,08
Трудоемкость очистных работ Complexity of treatment	чел. см/м³ people cm/m³	0,13	0,07	0,09
Трудоемкость подготовки Complexity of training	чел. см/м³ people cm/m³	0,25	0,25	0,25
Производительность блока Block performance	м³/мес. m³/month	2200	5500	3700

Для заполнения выработанного пространства могут быть использованы три состава твердеющей закладки, способных обеспечить необходимую проч-

ность и транспортабельность, а также позволяющие утилизировать породы от проходки выработок и золу котельной (табл. 4).

**Таблица 4.** Составы твердеющих смесей

**Table 4.** Compositions of hardening mixtures

Портландцемент М-400, кг/м <sup>3</sup> Portland cement M-400, kg/m <sup>3</sup>	Вяжущие добавки, кг/м <sup>3</sup> Cementing additives, kg/m <sup>3</sup>	Инертный заполнитель, кг/м <sup>3</sup> Inert aggregate, kg/m <sup>3</sup>	Вода, дм <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> Water, dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Прочность, 28 сут., МПа Durability, 28 days, MPa
Состав 1 расход 40 Composition 1, consumption 40	мокроемолотый шлак, 360 ground slag, 360	1300	360	4
Состав 2 расход 140 Composition 2 consumption 140	мокроемолотый шлак, 260 ground slag, 260	1300	360	3,9
Состав 3 расход 140 Composition 3 Consumption 140	измельченные известняки, 260 ground limestones, 260	1300	360	2,5

По прочности составы пригодны как для камерной, так и для слоевой систем разработки.

Себестоимость выбранных составов твердеющей закладки оказалась практически одинакова, хотя у варианта с использованием в качестве заполнителя дробленых пород она оказалась несколько больше.

Экономическая оценка возможных вариантов отработки месторождения осуществляется при соблюдении условий:

- при одинаковом годовом погашении балансовых запасов независимо от применяемых вариантов систем разработки;
- при интенсификации погашения балансовых запасов за счет применения в вариантах II и III высокопроизводительной камерной системы разработки (варианты IIa и IIIa с увеличением интенсивности отработки на 15 % и вариант IIб – с увеличением интенсивности отработки на 30 %);
- использование цен по состоянию на 1991 г., поскольку последующие стохастические изменения цен не отражают истинного соотношения стоимостей.

Критерием оценки экономической эффективности сравниваемых вариантов является условная прибыль в расчете на 1 т балансовых запасов руды (табл. 5).

#### Обсуждение результатов

Если интенсивность отработки месторождения определяется не фронтом очистных работ, а технологическими факторами, например, пропускной спо-

собностью ствола, производительность рудника может быть обеспечена любым вариантом отработки месторождения (варианты I, II, III при одинаковом годовом погашении балансовых запасов). Величина условной прибыли на 1 т балансовых запасов по варианту III максимальна и при предельной цене на металл ЦI составляет 1,43 р. по отношению к варианту I и 1,17 р. – по отношению к варианту II. В случае, когда фронт очистных работ ограничен и сдерживает интенсивность отработки месторождения, применение камерной системы разработки с отбойкой руды из подэтажных ортов (штреков) позволяет при тех же площадях повысить концентрацию горных работ и интенсивность отработки месторождения по варианту III на 15 % (вариант IIIa) и по варианту II на 30 % (вариант IIб). Условная прибыль на 1 т балансовых запасов по вариантам IIIa и IIб примерно одинакова и при предельной цене на металл, равной ЦI, соответственно 2,1 и 2,9 р. Варианты II и III для обеспечения заданной производительности рудника и возможности повышения интенсивности отработки месторождения наиболее надежны.

Результаты исследования подтверждают наличие корреляции между природными и техногенными условиями эксплуатации недр [12–16].

Полученные результаты согласуются с выводами исследователей по обозначенной проблеме горного производства [17–20].

**Таблица 5.** Экономические показатели вариантов разработки  
**Table 5.** Economic performance of development options

Показатели/Indicators	При стабильном производстве With stable production			При интенсификации производства With the intensification of production		
	I	II	III	15 %	30 %	
Ценность добытого из балансовых руд металла, р./т Value of metal mined from balance ores, rub./t				IIa	IIIa	IIb
при $C_1$ /at $C_1$	59,4	57,9	59,1	57,9	59,1	57,9
при $C_2$ /at $C_2$	82,2	80,3	81,9	80,3	81,9	80,3
Условно-переменные затраты на добычу, транспорт и переработку запасов, р./т Variable costs for production, transportation and processing of reserves, rub./t	29,2 28,4	27,5 26,5	27,5 26,8	27,2 25,9	27,2 25,9	26,8 25,5
Дополнительный экономический эффект повышения интенсивности отработки, р./т Additional economic effect of increasing the intensity of mining, rub./t	–	–	–	+1,1	+1,1	2,0
Условная прибыль от освоения балансовых запасов, р./т; при $C_1$ Contingent profit from development of balance reserves, rub./t; at $C_1$	30,2 31,0	30,5 31,2	31,6 32,4	31,9 33,2	33,1 34,3	33,1 34,5
при $C_2$ /at $C_2$	53,1 53,8	52,8 53,8	54,4 55,1	54,2 55,5	55,8 57,1	55,4 56,8
Экономический эффект, р./т; при $C_1$ Economic effect, rub./t; at $C_1$	0	+0,3 +0,3	+1,4 +1,4	+1,7 +2,2	+2,9 +3,3	+2,9 +3,5
при $C_2$ /at $C_2$	–0,2 –0,1	+1,4 +1,3	+1,2 +1,7	+1,2 +1,8	+2,8 +3,3	+2,4 +3,0

Примечание: в числителе – затраты при использовании дробленых пород, в знаменателе – при использовании песка и песчано-гравийной смеси.

Note: the costs when using crushed rocks are in the numerator, the costs when using sand and sand and gravel mix are in the denominator.

## Заключение

При разработке скальных месторождений сложной структуры повышение эффективности выемки руд достигается селективизацией выемки запасов в пределах одного рудного поля за счет комбинирования систем разработки.

Оптимизация параметров комбинируемых систем разработки по критерию экономической эффективности возможна при максимальном учете геолого-структурных факторов локализации руд и механических свойств рудовмещающих пород, а также утилизации отходов собственного и смежных производств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 121–125.
- Тенденции развития минерально-сырьевой базы цветной металлургии России / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, Ю.В. Дмитрак, О.З. Габараев // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. – Вып. 2. – С. 117–128.
- Голик В.И., Захаров Е.И., Абрамкин Н.И. Освоение забалансовых запасов металлических руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2018. – Вып. 3. – С. 158–170.
- Gattinoni P., Pizzarotti E.M., Scesi L. Engineering geology for underground works. – Moscow: Springer, 2014. – 312 p.
- 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China / G. Wang, R. Li, E.J.M. Carranza, F. Yang // Ore Geology Reviews. – 2015. – V. 71. – P. 592–610.
- Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both / E. Ben-Awuah, O. Richter, T. Elkington, Y. Pourrahimian // International Journal of Mining Science and Technology. – 2016. – V. 26. – Iss. 6. – P. 1065–1071.
- Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / Y.J. Ping, C.W., Zhong Y.D. Sen, Y.J. Qiang // Computers and Geotechnics. – 2015. – V. 64. – P. 20–31.
- Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов / С.Е. Гавришев, С.Н. Корнилов, И.А. Пыталев, И.В. Гапонова // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 46–51.
- The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development / V.I. Golik, O.Z. Gabaraev, S.A. Maslennikov, Z.M. Khasheva, L.P. Shulgaty // The Social Sciences (Pakistan). – 2016. – V. 11. – № 18. – P. 4348–4351.
- Borujeni M.P., Gitinavard H. Evaluating the sustainable mining contractor selection problems: An imprecise last aggregation preference selection index method // Journal of Sustainable Mining. – 2017. – V. 16. – № 4. – P. 207–218.
- Mineral resources: geological scarcity, market price trends, and future generations / M.L.C.M. Henckens, E.C. van Ierland, P.P.J. Driessen, E. Worrell // Resources Policy. – 2016. – V. 49. – P. 102–111.
- A cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China / C. Zhou, Z. Gong, J. Hu, A. Cao, H. Liang // Waste Management. – 2015. – V. 35. – P. 191–198.
- Минимизация влияния горного производства на окружающую среду / В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, О.З. Габараев, Х.Х. Кожиев // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. – № 6. – С. 26–29.
- Adibi N., Ataee-pour M., Rahmanpour M. Integration of sustainable development concepts in open pit mine design // Journal of Cleaner Production. – 2015. – V. 108. – P. 1037–1049.
- Ensuring safe operation and assessing the condition underground structures by the method of acoustic resonance flaw detection / B. Meskhi, M. Pleshko, Y. Buligin, L. Alexeenko, M. Molev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – P. 212–217.
- Дмитрак Ю.В., Голик В.И., Вернигор В.В. Геомеханические предпосылки сохранения устойчивости выработок при разработке водообильных месторождений // Известия Тульского



- государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 218–229.
17. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database / V.B. Zaalishvili, D. Melkov, A.S. Kanukov, B.V. Dzeranov // International Journal of GEOMATE. – 2016. – V. 10. – № 1. – P. 1656–1661.
18. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Лисовой И.А. Повышение экологической безопасности горного производства на основе использования отходов добычи и переработки рудного сырья // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. – № 4. – С. 4–10.
19. Волков Е.П., Анушенков А.Н. Разработка технологии закладки горных выработок твердеющими смесями на основе хвостов обогащения // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 7. – С. 5–13.
20. Мухаметшин В.В., Андреев В.Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на расширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 30–26.

Поступила 04.09.2020 г.

#### Информация об авторах

**Голик В.И.**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра РАН; профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета.

**Лукьянов В.Г.**, доктор технических наук, профессор, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Качурин Н.М.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геотехнологии и строительства подземных сооружений, Тульский государственный университет.

**Стась Г.В.**, доктор технических наук, доцент кафедры геотехнологии и строительства подземных сооружений, Тульский государственный университет.

UDC 504.55.054: 622 (470.6)

## EFFICIENCY OF COMBINING ORE MINING TECHNOLOGIES WITHIN AN ORE FIELD

Vladimir I. Golik<sup>1,2</sup>,  
v.i.golik@mail.ru

Victor G. Lukyanov<sup>3</sup>,  
lukyanov@tpu.ru

Nikolay M. Kachurin<sup>4</sup>,  
ecology\_tsu\_tula@mail.ru

Galina V. Stas<sup>4</sup>,  
galina\_stas@mail.ru

<sup>1</sup> Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.

<sup>2</sup> North Caucasus State Technological University,  
44, Cosmonaut Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050 Russia.

<sup>4</sup> Tula State University,  
92, Lenin avenue, Tula, 300012, Russia, Russia.

**The relevance of the study.** The article is devoted to the urgent problem of improving the technology for developing complex structural rocky deposits to increase the production of rare and valuable metals contained in ores, the deficiency of which increases with the development of scientific and technological progress.

**The purpose** of the study is to determine the conditions for combining development systems of different classes in order to increase the possibilities for selection of mining operations using various options for ore extraction in adjacent mining areas.

**The methodology of the study.** The basis of the study is the economic calculation of possible combinations within the ore field based on experimentally obtained information about the ore-bearing massif.

**Results.** The authors have characterized the ore bedding conditions at a specific rock deposit of complex structure, carried out the engineering geological zoning of the rocks of the ore-bearing massif with a differentiated assessment of geological and structural disturbances in magnitude and direction and made the forecast of the possible behavior of mine workings, by analogy with the practice, under the influence of fault structures and macrocracks. At the level of expert evaluation, the appropriateness of using a layered or chamber development system with the laying of technological voids hardening mixtures is determined. For areas containing the main reserves of the ore balance sheet of the deposit, the effectiveness of development systems was assessed by comparing alternative options for layer and chamber excavation, as well as the same shopping.

**Conclusions.** The efficiency of ore mining is achieved by selection of reserves mining within the same ore field when combining mining systems with the maximum allowance for the geological and structural factors of ore localization and the mechanical and physical properties of ore-bearing rocks.

#### Key words:

Ore body, development technology, geological conditions, filling mixture, economic calculation, optimization.

#### REFERENCES

- Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design principles and selection of subsurface development technologies for sustainable development of underground mines. *Mining Journal*, 2017, no. 11, pp. 121–125. In Rus.
- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z. Trends in the development of the mineral resource base of non-ferrous metallurgy in Russia. *Bulletin of Tula State University. Earth sciences*, 2019, Iss. 2, pp. 117–128. In Rus.
- Golik V.I., Zakharov E.I., Abramkin N.I. Development of off-balance reserves of metal ores. *Bulletin of Tula State University. Earth sciences*, 2018, Iss. 3, pp. 158–170. In Rus.
- Gattinoni P., Pizzarotti E. M., Scesi L. *Engineering geology for underground works*. Moscow, Springer, 2014. 312 p.
- Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 71, pp. 592–610.
- Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, vol. 26, Iss. 6, pp. 1065–1071.
- Ping Y.J., Zhong C.W., Sen Y.D., Qiang Y.J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 64, pp. 20–31.
- Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., Gaponova I.V. Improving the economic efficiency of mining enterprises by involving technogenic geo-resources in operation. *Mining Journal*, 2017, no. 12, pp. 46–51. In Rus.
- Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development. *The Social Sciences (Pakistan)*, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 4348–4351.
- Borujeni M.P., Gitinavard H. Evaluating the sustainable mining contractor selection problems: An imprecise last aggregation preference selection index method. *Journal of Sustainable Mining*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 207–218.

11. Henckens M.L.C.M., Van Ierland E.C., Driessen P.P.J., Worrell E. Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy*, 2016, vol. 49, pp. 102–111.
12. Zhou C., Gong Z., Hu J., Cao A., Liang H. A cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China. *Waste Management*, 2015, vol. 35, pp. 191–198.
13. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z., Kozhiev Kh.Kh. Minimizing the impact of mining on the environment. *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 6, pp. 26–29. In Rus.
14. Adibi N., Ataee-pour M., Rahmanpour M. Integration of sustainable development concepts in open pit mine design. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 108, pp. 1037–1049.
15. Meskhi B., Pleshko M., Buligin Y., Alexeenko L., Molev M. Ensuring safe operation and assessing the condition underground structures by the method of acoustic resonance flaw detection IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 2017. pp. 212–217.
16. Dmitrak Yu.V., Golik V.I., Vernigor V.V. Geomechanical prerequisites for maintaining the stability of workings during the development of water-abundant deposits. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*, 2018, no. 1, pp. 218–229. In Rus.
17. Zaalishvili V.B., Melkov D., Kanukov A.S., Dzeranov B.V. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE*, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 1656–1661.
18. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Lisovoy I.A. Improving the environmental safety of mining based on the use of waste from mining and processing of ore raw materials. *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 4, pp. 4–10. In Rus.
19. Volkov E.P., Anushenkov A.N. Development of the technology for laying mines with hardening mixtures based on enrichment tailings. *Izvestiya Vuzov. Mountain Journal*, 2019, no. 7, pp. 5–13. In Rus.
20. Mukhametshin V.V., Andreev V.E. Improving the effectiveness of evaluating the effectiveness of technologies aimed at expanding the use of the resource base of deposits with hard-to-recover reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 26–30. In Rus.

Received: 4 September 2020.

#### Information about the authors

**Vladimir I. Golik**, Dr. Sc., professor, chief researcher, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences; professor, North Caucasus State Technological University.

**Victor G. Lukyanov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Nikolay M. Kachurin**, Dr. Sc., professor, Head of the Department of Geotechnology and Construction of Underground Structures, Tula State University.

**Galina V. Stas**, Dr. Sc., associate professor, Tula State University.

УДК 622.24.051.64

## ВЛИЯНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ГЛУБИНУ РЕЗАНИЯ–СКАЛЫВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ АЛМАЗНЫМ РЕЗЦОМ

Нескоромных Вячеслав Васильевич<sup>1</sup>,  
sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна<sup>1</sup>,  
alleniram83@mail.ru

Харитонов Антон Юрьевич<sup>2</sup>,  
ant.kharitonov@gmail.com

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

<sup>2</sup> ООО «Витэк-Автоматика»,  
Россия, 198035, г. Санкт-Петербург, Набережная реки Фонтанки, 170.

**Актуальность.** Разработка бурового породоразрушающего инструмента всегда нацелена на повышение эффективности и ресурса его работы, а также на расширение области его применения. Важной составляющей данного процесса является изучение механизма разрушения горной породы рабочей частью разрабатываемого инструмента. Самым сложным, но важным является исследование глубины резания–скалывания горной породы резцом. Несмотря на мелкие габариты рассматриваемой системы, для более достоверного результата необходимо учитывать все факторы, влияющие на процесс разрушения горной породы резцом. Если говорить о наиболее весомых факторах, которые оказывают влияние на эффективность разрушения горной породы, необходимо отметить силы сопротивления, возникающие на забое скважины. Самым мелким резцом обладает алмазный породоразрушающий инструмент. Алмазный тип бурового инструмента является довольно востребованным в производстве. В связи с этим актуальным является развитие теории и возможностей исследования механизма разрушения горной породы алмазным резцом с учетом возникающих на забое процессов и явлений, в том числе и прелатствующих внедрению его в породу.

**Цель:** выявление возможных источников сил сопротивления внедрению алмазного резца в горную породу; определение степени влияния сил сопротивления и других факторов на величину глубины резания–скалывания породы алмазным резцом.

**Объекты:** механизм разрушения горной породы единичным алмазным резцом.

**Методы:** экспериментальные, аналитические исследования, анализ, метод компьютерного моделирования.

**Результаты.** Разработан программный продукт, позволяющий детально исследовать механизм разрушения горной породы единичным алмазным резцом. Определено, что сопротивление со стороны среды, возникшей на забое скважины, оказывает влияние на результирующую величину глубины резания–скалывания горной породы алмазным резцом. Величина результирующей силы сопротивления резцу зависит от вида промывочной жидкости и типа разрушаемой горной породы. Выяснено, что по мере роста линейной скорости перемещения резца наблюдается рост сопротивления горной породы и снижение глубины внедрения резца в горную породу.

**Ключевые слова:**

Буровой инструмент, механизм разрушения, алмазный резец, сила сопротивления, моделирование.

### Введение

Направление современного проектирования бурового породоразрушающего инструмента непосредственно связано с повышением эффективности, ресурса работы и расширением области его применения [1–22]. Компьютерное моделирование обладает большими возможностями в научном исследовании различных процессов [15–30] и на данный момент остается востребованным методом в том числе и в области разработки породоразрушающего инструмента.

Разработка бурового породоразрушаемого инструмента начинается с исследования механизма разрушения горной породы его рабочей поверхностью. В ранее проведенных работах [1–14, 19, 20, 27, 28] доказано, что на результат использования породоразрушающего инструмента оказывает влияние целая система факторов.

Основным разрушающим породу элементом бурового инструмента является резец. В бурении известны

различные виды резцов, отличающиеся составом, прочностными характеристиками, формой, размерами, назначением и т. д. Один и тот же резец может выполнять различные функции в зависимости от его местоположения и геометрии расположения в породоразрушающем инструменте.

Поэтому в основном исследованию подвергается тип, форма, размер, геометрия установки резца в буровом инструменте, а также тщательно изучаются процессы и явления, влияющие на эффективность разрушения породы конкретным резцом или группой резцов.

Изучение разрушения горной породы одним резцом затруднено его небольшими размерами. Размеры резцов современного востребованного, особенно алмазного, бурового инструмента зачастую не превышают 1 мм. При этом процессы, которые протекают в пределах такого элемента, в значительной степени влияют на общий результат бурения. Использование компьютерного моделирования позволяет без затруд-

нений, точно и наглядно исследовать мелкогабаритные системы [5, 9, 10, 11, 13, 15–28], что является преимуществом использования его при проектировании бурового породоразрушающего инструмента и дает возможность развития научной теории в области разрушения горной породы [5, 6, 10, 13, 19, 27, 28].

#### Постановка проблемы

Как известно [1–14, 16–18, 20], при бурении область разрушения горной породы отличается от величины внедрения в нее алмазного резца. Причем величина глубины резания–скалывания породы алмазом колеблется в зависимости от многих факторов процесса бурения.

Основной силой, способствующей внедрению алмазного резца в породу, является результирующее усилие ( $R$ ) (рис. 1), возникающее в результате действия осевого и тангенциального усилий. Идеальным случаем эффективного разрушения забоя является полная реализация приложенных к резцу сил. Однако резец испытывает неизбежное сопротивление со стороны забоя. Помимо известного сопротивления со стороны неразрушенного горного массива, на резец оказывает воздействие образовавшаяся на забое жидкая среда. Такая среда состоит из промывочного агента и шлама, т. е. является плотным веществом, подверженным гидродинамике процесса бурения.

#### Методика

Рассмотрим воздействие всех, описанных выше, сил на алмазный резец по схеме, приведенной на рис. 1. Противодействующими внедрению резца в породу силами являются: усилие  $F_n$ , направленное навстречу осевому усилию;  $R_c$ , являющееся результатом течения промывочного агента;  $R_n$  – сопротивление рыхлой породы, находящейся под ядром сжатия.

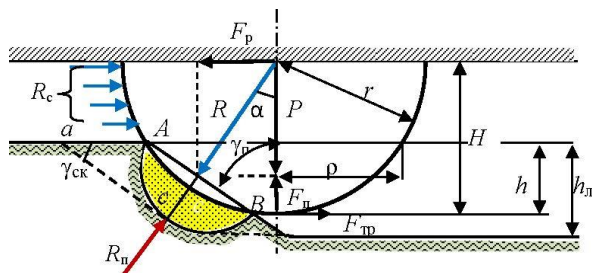


Рис. 1. Схема исследования внедрения алмазного резца в горную породу

Fig. 1. Diagram for studying rock destruction with a diamond cutter

Как следует из анализа схемы механизма разрушения горной породы алмазным резцом, формула для расчета усилия резания–скалывания, с учетом проведенных ранее аналитических преобразований [12], будет выглядеть следующим образом:

$$F_p = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск} (1 + \operatorname{tg} \varphi_n)}{2 \operatorname{tg} \gamma_{ск}} + f(P - F_n) + R_c \cos \gamma_n, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина внедрения алмаза в горную породу, м;  $d$  – диаметр алмазного резца, м;  $\sigma_{ск}$  – предел прочности на скалывание горной породы, Па;  $\varphi_n$  – угол внутреннего трения в деформируемых объемах породы перед передней гранью резца, град;  $\gamma_{ск}$  – угол скалывания горной породы перед передней гранью резца, град;  $f$  – коэффициент трения алмазного резца о горную породу в условиях присутствия среды;  $P$  – осевая нагрузка на резец, Н;  $F_n$  – усилие, вызванное сопротивлением среды, направленное навстречу осевому усилию, Н;  $F_т$  – сила трения алмазного резца о породу в условиях присутствия среды, Н;  $R_c$  – сопротивление среды, Н;  $\gamma_n$  – передний угол резца, град.

При этом усилие резания–скалывания горной породы можно представить несколько иначе:

$$F_p = \frac{(P - F_n)}{\operatorname{tg} \gamma_n}, \quad (2)$$

где усилие, направленное навстречу осевому усилию,  $F_n$  (рис. 1) определяется по формуле:

$$F_n = R_c \sin \gamma_n \cos \gamma_n. \quad (3)$$

В формуле (3) сопротивление среды можно рассчитывать по известной формуле Бернулли для скоростного напора

$$R_c = 0,5 v_p^2 C_c \rho_c S \quad (4)$$

и формуле для расчета площади передней поверхности резца

$$S = 0,125 \pi d H,$$

где  $v_p$  – линейная скорость перемещения резца, м/с;  $C_c$  – коэффициент формы резца (ориентировочно может изменяться от 1 – плоский резец, до 0,5 – приостренный, ориентированный гранью вперед);  $\rho_c$  – весовая плотность среды, Н/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь передней поверхности резца, м<sup>2</sup>;  $H$  – выпуск алмаза из матрицы, м.

С учетом площади контактирующего со средой резца, формула расчета реакции будет выглядеть следующим образом

$$R_c = 0,0625 v_p^2 C_c \rho_c \pi d H. \quad (5)$$

Если принять, что  $v_p = 2\pi \omega r$ , то по формуле (5) можно определить сопротивление среды в зависимости от частоты вращения бурового инструмента  $\omega$  и радиуса торца коронки  $r$  – расстояния от центра торца до точки установки алмазного резца:

$$R_c = 0,25 \pi^3 \omega^2 r^2 C_c \rho_c d H.$$

Решение уравнений (1) и (2) для определения усилия резания–скалывания горной породы резцом  $F_p$  позволило получить следующее выражение:

$$\frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск}}{2 \operatorname{tg} \gamma_{ск}} (1 + \operatorname{tg} \varphi_n) + f(P - R_c \sin \gamma_n \cos \gamma_n) + R_c \cos \gamma_n - \frac{(P - R_c \sin \gamma_n \cos \gamma_n)}{\operatorname{tg} \gamma_n} = 0,$$

учитывающее многие факторы исследуемой системы, а именно схемы разрушения горной породы алмазным резцом с учетом геометрических параметров, внешних силовых, а также характеристик разрушаемой породы.

После преобразований имеем:

$$\frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{\text{ск}}}{2\text{tg}\gamma_{\text{ск}}} (1 + \text{tg}\varphi_{\text{п}}) + R_{\text{с}} \cos\gamma_{\text{п}} + (P - R_{\text{с}} \sin\gamma_{\text{п}} \cos\gamma_{\text{п}}) \left( f - \frac{1}{\text{tg}\gamma_{\text{п}}} \right) = 0. \quad (6)$$

Для дальнейшего исследования, математического преобразования сложного выражения, проверки адекватности получаемых результатов и предложенной математической модели в среде графического программирования *LabVIEW* [23–26] разработан программный продукт *Burenie\_almazom03.avi*. Опыт применения компьютерного моделирования разрушения горной породы в среде *LabVIEW* [28] показал, что данный метод исследования дает довольно достоверные и точные результаты.

Полученная программа реализует всесторонний расчет описанной математической модели: учитывает размеры алмазного резца, переводит все размерности исходных данных в систему СИ и, реализуя алгоритм вычислений формул (1)–(6), определяет глубину резания породы алмазом с учетом силы сопротивления образовавшейся на забое среды.

Для полной картины разрушения горной породы алмазом, помимо глубины резания, необходимо также рассматривать размеры и направление распространения зоны предразрушения, которая указывает на возможную область разрушения горной породы алмазным резцом. Для этого в программу заложен расчет глубины проникновения ядра сжатия породы в направлении действия осевой силы, т. е. глубины борозды разрушения, определяемой по формуле (7):

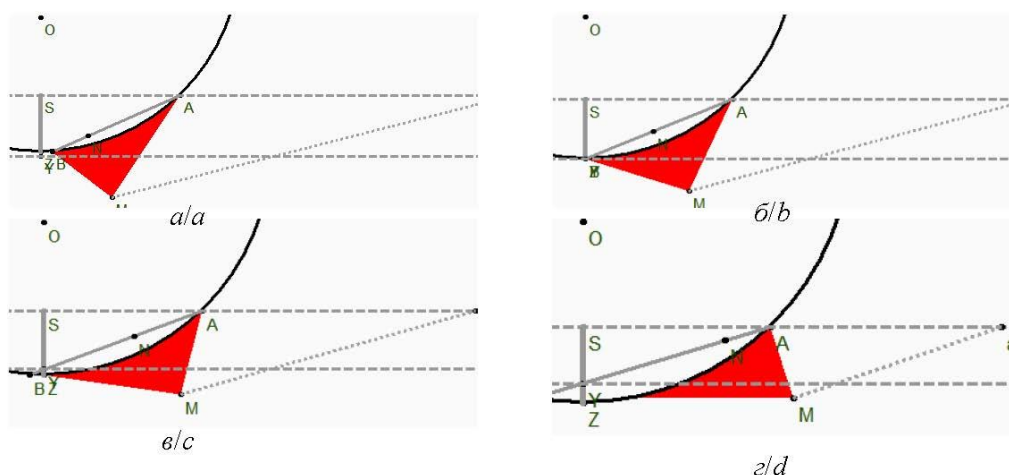
$$h_{\text{л}} = 0,25 \cos\alpha (2h + \sqrt{dh}), \quad (7)$$

а также глубины проникновения ядра сжатия в направлении действия результирующей осевого и тангенциального усилий, действующих на алмаз, которую можно найти по формуле (8):

$$MN = 0,25(2h + \sqrt{dh}). \quad (8)$$

Такая программа позволяет исследовать механизм разрушения породы алмазами различного размера при заданном (или предполагаемом) выпуске алмаза и различных показателях осевого и тангенциального усилий с учетом сопротивления среды, образовавшейся на забое скважины. При этом учитываются различные свойства разрушаемой породы. Программа позволяет исследовать такие труднодоступные для производственного эксперимента процессы, как механизм разрушения породы одним алмазом, размер которого может достигать десятки доли миллиметра, а площадь разрушения породы не превышает 1 мм<sup>2</sup>.

К примеру, при бурении в известняке ( $\sigma_{\text{ск}}=19$  МПа) инструментом, армированным алмазом диаметром 0,9 мм, при осевой нагрузке  $P=5$  Н и скорости резания  $v_0=3$  м/с, перебирая значения тангенциального усилия, можно наблюдать изменение направления ядра сжатия и выбрать из ряда оптимальное значение для эффективного бурения в предложенных условиях (рис. 2). *Burenie\_almazom03.avi*. производит моментальный расчет, строит схему взаимодействия алмазного резца с породой (рис. 2) и выводит ее на экран. Так, оптимальным для исследуемых условий будет значение тангенциального усилия в пределах от 4 до 7 Н. В этом случае ядро сжатия располагается перед передней гранью алмаза (рис. 2, в), что приводит к скалыванию и резанию горной породы, а учитывая твердость известняка, – такое расположение сил способствует более эффективному его разрушению.



**Рис. 2.** Результаты компьютерного моделирования механизма разрушения известняка алмазом 0,9 мм при осевом усилии 5 Н: а)  $F_m=2$  Н; б)  $F_m=3$  Н; в)  $F_m=4$  Н; г)  $F_m=6$  Н

**Fig. 2.** Results of computer simulation of the mechanism of limestone destruction by 0,9 mm diamond with axial force 5 H: а)  $F_m=2$  Н; б)  $F_m=3$  Н; в)  $F_m=4$  Н; г)  $F_m=6$  Н

#### Анализ

Полученные результаты компьютерного моделирования подтверждают выводы, сделанные в исследованиях [12], что указывает на адекватность пред-

ложенной математической модели и позволяет использовать ее для дальнейшего изучения особенностей механизма разрушения горной породы алмазным резцом.

Результаты компьютерного моделирования показали, что среда, образовавшаяся из смеси промывочного агента и шлама на забое, оказывает влияние на величину глубины резания–скалывания алмазом. На изменение реакции сопротивления среды оказывает влияние ее плотность и скорость резания. На плотность, соответственно, влияют тип промывочного агента и вид разрушаемой горной породы. Скорость резания–скалывания в свою очередь определяется частотой вращения породоразрушающего инструмента и местоположением исследуемого алмаза. К тому же, немаловажной является форма алмазного резца и геометрические параметры его установки в породоразрушаемом инструменте.

Особенностью круглого резца, к примеру, является то, что передний его угол постоянно может меняться при изменении глубины погружения резца в горную породу. Ориентировочно передний угол можно определить по зависимости (9):

$$\gamma_n = 90 - \alpha, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами резания–скалывания (рис. 1) горной породы резцом, град.

Более точно, с учетом глубины внедрения резца в горную породу, передний угол резца можно определить по формуле (10):

$$\gamma_n = 90 - 0,5 \arccos \frac{r - h_{yn}}{r}, \quad (10)$$

где  $h_{yn}$  – глубина внедрения алмаза в породу при статическом вдавливании, определяется по формуле (11).

$$h_{yn} = r - \sqrt{r^2 - \frac{P}{\pi p_m (1 + \operatorname{tg} \varphi)}}, \quad (11)$$

где  $p_m$  – твердость горной породы.

Для более точного решения можно использовать формулу с учетом силы  $R_c$ , выталкивающей резец из породы, и это выражение уже будет достаточно близко к значению внедрения алмаза в породу в процессе резания–скалывания, т. е. в динамике:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{P - 0,0625 v_p^2 C_c p_c \pi d H \sin \gamma_n \cos \gamma_n}{\pi p_m (1 + \operatorname{tg} \varphi)}}. \quad (12)$$

Для расчета величины переднего угла резца важно определить угол  $\alpha$ , который указывает направление действия результирующей силы  $R$ . Для резцов разной формы (необработанный, с острыми гранями, овализованный, полированный) значения угла  $\alpha$  определены на основании экспериментальных данных ВИТРа, приведенных в работе [14], в которой представлены значения, позволяющие рассчитать данный угол. Данные из работы [14] приведены в таблице.

**Таблица.** Усилия, возникающие при работе алмазных резцов разной степени обработки (результаты опытного эксперимента)

**Table.** Results of the experimental determination of efforts during the work of diamond tools

Порода/Rock	Алмаз необработанный/Rough diamond				
	Нагрузка на алмаз Diamond load $P$ , даН	Сила трения Friction force $F_{тр}$ , даН	Тангенциальное усилие Tangential force $F_p$ , даН	$\frac{P}{F_p}$	$\frac{F_{тр}}{F_p}$
<i>Средней твердости/Medium hard</i>					
Мрамор/Marble	8,2	3,7	7,05	1,16	0,53
Известняк/Limestone	6,13	2,76	3,78	1,62	0,73
Сланец/Slate	3,99	1,8	2,98	1,34	0,61
<i>Твердые и очень твердые/Hard and very hard</i>					
Альбитофир/Albitofire	5,27	2,36	3,7	1,42	0,64
Роговик/Horn	5,34	2,5	2,62	2,04	0,95
Роговик магнетитовый/Magnetite horn	4,8	2,16	2,52	1,89	0,86
Гранит/Granite	3,96	1,78	2,21	1,8	0,81
Алмаз овализованный/Ovalized diamond					
<i>Средней твердости/Medium hard</i>					
Мрамор/Marble	2,71	1,21	2,45	1,1	0,49
Известняк/Limestone	6,24	2,8	3,84	1,62	0,73
Сланец/Slate	6,1	2,74	4,0	1,52	0,69
<i>Твердые и очень твердые/Hard and very hard</i>					
Альбитофир/Albitofire	7,78	3,5	6,56	1,18	0,53
Роговик/Horn	6,18	2,78	4,35	1,42	0,64
Роговик магнетитовый/Magnetite horn	5,13	2,3	2,72	1,89	0,85
Гранит/Granite	6,52	2,94	3,84	1,9	0,86
Алмаз полированный/Polished diamond (расчетные данные при коэффициенте трения 0,056) (calculated data with friction coefficient 0,056)					
<i>Средней твердости/Medium hard</i>					
Мрамор/Marble	2,71	0,15	1,39	1,95	0,11
Известняк/Limestone	6,24	0,35	1,39	4,5	0,25
Сланец/Slate	6,1	0,34	1,6	3,8	0,21
<i>Твердые и очень твердые/Hard and very hard</i>					
Альбитофир/Albitofire	7,78	0,43	3,49	2,23	0,12
Роговик/Horn	6,18	0,35	1,92	3,2	0,18
Роговик магнетитовый/Magnetite horn	5,13	0,29	0,71	7,1	0,41
Гранит/Granite	6,52	0,37	0,8	8,15	0,46



Из расчетов, с использованием данных из таблицы, следует, что среднее значение отношения осевого и тангенциального усилий ( $P/F_p$ ) для алмазов различного вида обработки неодинаково. Так, для необработанного алмаза такое отношение составляет 1,37 в случае бурения и 1,79 в твердых породах. В случае использования овалированного алмаза  $P/F_p=1,41$  (в породах средней твердости) и  $P/F_p=1,6$  (в твердых породах). Для полированного алмаза  $P/F_p=2-4$  (в породах средней твердости) и  $P/F_p=7-8$  (в твердых и крепких породах), что существенно выше, чем с овалированными и необработанными алмазами.

Таким образом, угол  $\alpha$ , который образуется между вектором осевого  $P$  и результирующего усилий  $R$  (рис. 3) будет следующим:

- для необработанного, а также овалированного алмазов  $33-39^\circ$  (при бурении в горных породах средней твердости) и  $30^\circ$  (при бурении в породах твердых и крепких);
- для полированных алмазов  $14-26^\circ$  (при бурении пород средней твердости) и  $7-8^\circ$  (в более твердых породах) [12].

В процессе работы породоразрушающего инструмента с необработанными или овалированными алмазами в качестве резцов ядро сжатия породы располагается на передней грани такого резца, что способствует скалыванию и резанию породы средней твердости.

При использовании полированного алмаза, в процессе разрушения твердых и крепких горных пород, ядро сжатия смещается под резец (рис. 3, б), что соответствует раздавливанию такой породы. За счет увеличения угла  $\alpha$  происходит смещение ядра сжатия на переднюю грань резца при бурении пород средних по твердости. Такое смещение дает возможность скалыванию породы, хотя при этом порода по-прежнему преимущественно разрушается раздавливанием.

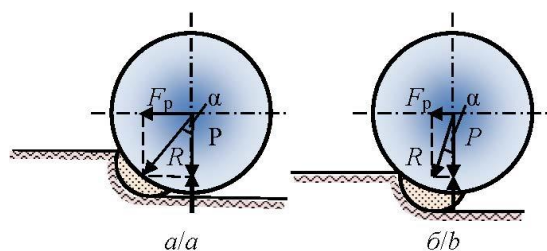


Рис. 3. Схемы взаимодействия алмазных резцов с породой: а) овалированного; б) полированного

Fig. 3. Schemes of interaction of diamond cutters with rock: a) ovulated; b) polished

На рис. 4 представлены графики зависимости сопротивления среды  $R_c$  при плотности среды  $1,5 \text{ г/см}^3$  (зависимость (5)) от линейной скорости перемещения резца для различных диаметров резца. Выпуск резца из матрицы  $H$  определялся как  $1/3$  диаметра резца.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при линейной скорости в пределах  $1-5 \text{ м/с}$  сопротивление среды может достигать существенного влияния. Выбранные значения линейных скоростей соответствуют частоте вращения буровых алмазных коронок диаметром от 46 до 93 мм в пределах  $1000-1500 \text{ мин}^{-1}$ .

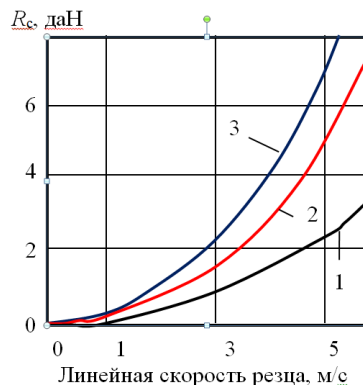


Рис. 4. Зависимость сопротивления среды от линейной скорости резца при диаметре резца (мм): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

Fig. 4. Dependence of the medium resistance on the linear speed of the cutter with the diameter of the cutter (mm): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

На рис. 5 для тех же условий, что использованы при построении графиков на рис. 3, представлены зависимости величины выталкивающей силы (формула (3)), вызванной сопротивлением среды, от линейной скорости перемещения резцов.

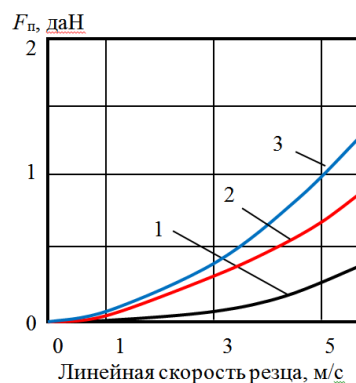


Рис. 5. Зависимость усилия  $F_n$  от линейной скорости резца при диаметре резца (мм): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

Fig. 5. Dependence of the force  $F_n$  on the linear speed of the cutter with the diameter of the cutter (mm): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

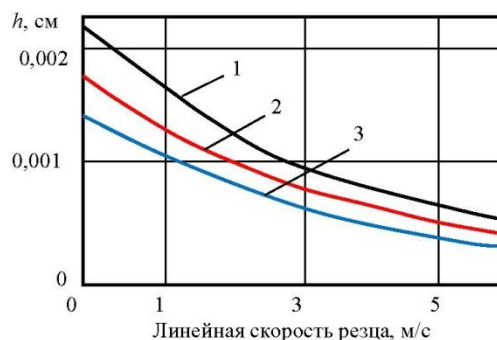


Рис. 6. Зависимость глубины внедрения резца в горную породу от линейной скорости перемещения резца диаметром (мм): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

Fig. 6. Dependence of the cutter penetration depth into the rock on the linear speed of the cutter movement. Cutter diameter (mm): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6



С учетом влияния силы сопротивления среды и роста сопротивления горной породы по мере роста линейной скорости перемещения резца наблюдается снижение глубины внедрения резца в горную породу, что следует из формулы (12) и результатов компьютерного моделирования. На рис. 6 представлены графические зависимости, полученные по формуле (12) и при использовании данных, по которым получены графики на рис. 4 и 5.

#### Выводы

1. Компьютерное моделирование – надежный метод исследования механизма разрушения горной породы мелким резцом, в том числе алмазным. Такой метод позволяет достоверно изучать мелкогабаритные системы взаимодействия одного алмаз-

ного зерна с горной породой с учетом всех процессов, сопутствующих бурению скважин.

2. На величину глубины резания–скалывания породы алмазным резцом оказывает значительное влияние сопротивление среды, образовавшейся на забое скважины и состоящей из промывочной жидкости и разрушенной горной породы.
3. Степень влияния сопротивления среды на величину глубины резания–скалывания горной породы алмазным резцом зависит от типа промывочного агента, вида разрушаемой породы, формы и геометрии установки резца, а также от скорости перемещения резца.
4. С ростом линейной скорости перемещения резца наблюдается снижение глубины внедрения резца в горную породу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Пушмин П.С. Обоснование модели алмазной коронки на основе исследования механики разрушения твердых анизотропных пород: дис. ... канд. наук. – Иркутск, 2006. – 131 с.
3. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осецкий, Н.В. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.
4. Горшков Л.К., Осецкий А.И. Развитие принципов конструирования и эксплуатации нового алмазного породоразрушающего инструмента // Записки Горного института. – 2012. – Т. 197. – С. 40–45.
5. 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.
6. 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.
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. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. I. – С. 463–464.
9. Механико-математическое и экспериментальное моделирование устойчивости скважин в анизотропных геосредах / Д.М. Климов, В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устинов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2013. – № 4. – С. 4–12.
10. 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.
11. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка алмазного инструмента с применением данных компьютерного моделирования и результатов системных исследований // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – № 3. – С. 18–26.
12. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 336 с.
13. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48 (3). – P. 434–442.
14. Киселев А.Т., Крусири И.Н. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 102 с.
15. Александров А.Н., Кищенко М.А., Рогачев М.К. Моделирование образования твердых органических частиц в высокопарафинистой пластовой нефти // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – № 2. – С. 42–49.
16. 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.
17. Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit // Energies. – 2018. – V. 11 (6). – P. 1326–1331.
18. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10 (6). – P. 476–479.
19. Сериков Д.Ю., Гаффаров Р.Ф. Исследование напряженно-деформируемого состояния двух смежных центробежно-объемного-армированных зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – № 9. – С. 42–47.
20. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45 (8). – P. 1347–1360.
21. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2020. – V. 190. – Art. no. 107120.
22. 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.
23. Королев А.Л. Компьютерное моделирование. – М.: БИНОМ. ЛТЗ, 2013. – 230 с.
24. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. 4-е изд., переработанное и дополненное. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.
25. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.
26. Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде LabVIEW. – СПб.: Университет информационных технологий, механики и оптики, 2015. – 82 с.
27. Попова М.С. Результаты компьютерного моделирования температурного режима алмазного бурового инструмента // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – № 2. – С. 23–26.
28. Попова М.С., Харитонов А.Ю. Компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 18–27.
29. Borja R.I., Sama K.M., Sanz P.F. On the numerical integration of three-invariant elastoplastic constitutive models // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2003. – V. 192 (9–10). – P. 1227–1258.
30. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – № 119. – P. 224–236.

Поступила 08.09.2020 г.

#### **Информация об авторах**

**Нескоромных В.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

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

**Харитонов А.Ю.**, кандидат технических наук, сертифицированный LabVIEW-разработчик, инженер, ООО «Витэк-Автоматика».

UDC 622.24.051.64

## INFLUENCE OF RESISTANCE FORCES ON THE DEPTH OF ROCK CUTTING–CHIPPING BY A DIAMOND CUTTER

**Vyacheslav V. Neskoromnykh<sup>1</sup>,**  
sovair@bk.ru

**Marina S. Popova<sup>1</sup>,**  
alleniram83@mail.ru

**Anton Yu. Kharitonov<sup>2</sup>,**  
ant.kharitonov@gmail.com

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

<sup>2</sup> LLC «Vitek-Avtomatika»,  
170, Fontanka River Embankment, St. Petersburg, 198035, Russia.

**Relevance.** The development of drilling rock cutting tools is always aimed at improving the efficiency and resource of its work and to expand the scope. An important component of this process is the study of the mechanism of rock destruction by the working part of the tool being developed. The most difficult, but important is the study of the depth of rock cutting–chipping with a cutter. Despite the small dimensions of the system under consideration, for a more reliable result, it is necessary to take into account all the factors affecting rock destruction by a cutter. If we talk about the most significant factors that affect the efficiency of rock destruction, it is necessary to note the resistance forces that occur at the bottom of the well. The smallest cutter has a diamond rock cutting tool. The diamond type of drilling tool is quite in demand in production. In this regard, it is urgent to develop the theory and possibilities of studying the mechanism of rock destruction by a diamond cutter, taking into account the processes and phenomena occurring at the bottom, including those that impede its introduction into the rock.

**The aim** of the research is to identify the possible sources of resistance forces to the introduction of a diamond cutter into the rock, to determine the degree of influence of resistance forces and other factors on the value of the depth of rock cutting–chipping with a diamond cutter.

**Objects:** rock destruction mechanism with a single diamond cutter.

**Methods:** experiment, analytical studies, analysis, computer simulation method.

**Results.** A software product was developed that allows a detailed study of the mechanism of rock destruction by a single diamond tool. It is determined that the resistance from the side of the medium that arose at the bottom of the well affects the resulting value of the depth of cutting–chipping of the rock with a diamond cutter. The value of the resulting resistance force to the cutter depends on the type of flushing fluid and the type of rock being destroyed. It was found that as the linear velocity of the cutter increases, an increase in rock resistance and a decrease in the depth of penetration of the cutter into the rock are observed.

### Key words:

Drilling tool, destruction mechanism, diamond cutter, resistance force, modeling.

### REFERENCES

- Larin A.A. Issledovanie protsessov vzaimodeystviya almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta s anizotropnoy gornoy porodoy s tselyu vyyavleniya zakonornostey estestvennogo iskrivleniya skvazhin. Dis. Kand. nauk [Investigation of interaction of diamond rock cutting tools with anisotropic rock in order to identify patterns of natural curvature of wells. Cand. Diss.]. Tomsk, 2000. 192 p.
- Pushmin P.S. Obosnovanie modeli almaznoy koronki na osnove issledovaniya mekhaniki razrusheniya tverdykh anizotropnykh porod. Dis. Kand. nauk [Justification of the model of a diamond crown based on a study of the mechanics of fracture of solid anisotropic rocks. Cand. Diss.]. Irkutsk, 2006. 131 p.
- Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskii A.I., Soloviev N.V. Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Exploration and protection of the subsoil*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
- Gorshkov L.K., Osetskii A.I. Development of principles for the design and operation of a new diamond rock cutting tool. *Journal of Mining Institute*, 2012, vol. 197, pp. 40–45. In Rus.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 i 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, 463 p.
- Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. Mechano-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic geomechanics. *Izvestiya Rossiiskoy Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2013, no. 4, pp. 4–12. In Rus.
- 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, no. 149, pp. 393–408.
- Neskoromniy V.V., Popova M.S. Diamond tool development using computer modelling data and system research results. *Scientific and Technical Journal «Petroleum Engineer»*, 2018, no. 3, pp. 18–26. In Rus.

12. Neskoromnykh V.V. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin* [Destruction of rocks during drilling]. Moscow, INFRA-M; Krasnoyarsk, SFU, 2015. 336 p.
13. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
14. Kiselev A.T., Krusir I.N. *Vrashchatelno-udarnoe burenie geologorazvedochnykh skvazhin* [Rotary-shock drilling of exploration wells]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 102 p.
15. Aleksandrov A.N., Kishchenko M.A., Rogachev M.K. Modeling the formation of solid organic particles in highly paraffin reservoir oil. *Scientific and Technical Journal «Petroleum Engineer»*, 2018, no. 2, pp. 42–49. In Rus.
16. 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.
17. Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit. *Energies*, 2018, vol. 11 (6), pp. 1326–1331.
18. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
19. Serikov D.Y., Gaffanov R.F. Investigation of the stress-strain state of two adjacent centrifugal-volume-reinforced teeth of the armament of a bit drilling tool. *Scientific-technical journal «Construction of oil and gas wells on land and sea»*, 2018, no. 9, pp. 42–47. In Rus.
20. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
21. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
22. 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.
23. Korolev A.L. *Kompyuternoe modelirovanie* [Computer modelling]. Moscow, BINOM Publ., 2013. 230 p.
24. Travis J., Kring J. *LabVIEW dlya vseh* [LabVIEW for everyone]. Moscow, DMK Press, 2011. 904 p.
25. Magda Yu.S. *LabVIEW: prakticheskiy kurs dlya inzhenerov i razrabotchikov* [LabVIEW: a practical course for engineers and developers]. Moscow, DMK Press, 2012. 208 p.
26. Vasiliev A.S., Lashmanov O.Y. *Osnovy programmirovaniya v srede LabVIEW* [Basics of programming in the LabVIEW]. St. Petersburg, University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2015. 82 p.
27. Popova M.S. The results of computer simulation of the temperature regime of a diamond drilling tool. *Scientific and Technical Journal «Petroleum Engineer»*, 2018, no. 2, pp. 23–26. In Rus.
28. Popova M.S., Kharitonov A.Y. Computer simulation of processes at well drilling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 18–27. In Rus.
29. Borja R.I., Sama K.M., Sanz P.F. On the numerical integration of three-invariant elastoplastic constitutive models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, vol. 192 (9–10), pp. 1227–1258.
30. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.

Received: 8 September 2020.

#### Information about the authors

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

**Marina S. Popova**, Cand. Sc., senior teacher, Siberian Federal University.

**Anton Yu. Kharitonov**, Cand. Sc., certified LabVIEW developer.

УДК 502.5

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЭКОСИСТЕМНОГО РАЗНООБРАЗИЯ ЛАНДШАФТОВ РЕГИОНА ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Осипов Алексей Георгиевич<sup>1</sup>,  
zoyaks@yandex.ru

Дмитриев Василий Васильевич<sup>2</sup>,  
vasiliy-dmitriev@rambler.ru; v.dmitriev@spbu.ru

Ковязин Василий Федорович<sup>3</sup>,  
vfkedr@mail.ru

<sup>1</sup> Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,  
Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199026, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью сохранения ресурсо- и средовоспроизводящих функций ландшафтов при их антропогенном освоении. Одним из факторов, способствующих устойчивости ландшафтов к антропогенным нагрузкам, является их экосистемное разнообразие. В настоящее время на практике для определения экосистемного разнообразия широко используются методы картографического моделирования, однако они недостаточно эффективны из-за отсутствия актуализированной крупномасштабной картографической информации об экосистемном строении изучаемых ландшафтов.

**Цель:** разработать методику анализа экосистемного разнообразия ландшафтов региона с использованием материалов дистанционного зондирования и апробировать ее на территории Ленинградской области.

**Объекты:** экосистемное разнообразие ландшафтов.

**Методы:** дистанционное зондирование ландшафтов; построение цифровых моделей рельефа в среде ГИС; автоматизированное дешифрирование почвенно-растительного покрова; статистическая обработка данных аэросъемки; картографические обобщения; региональный ландшафтно-экологический анализ с использованием ГИС.

**Результаты.** Обоснована целесообразность использования материалов дистанционного зондирования для оценки экосистемного разнообразия ландшафтов региона. Разработана модель автоматизированного дешифрирования основных типов лесного растительного покрова по его вегетационным индексам; предложен подход к определению экосистемного разнообразия по материалам автоматизированного дешифрирования основных типов лесного растительного покрова. С использованием беспилотного летательного аппарата выполнена аэрофотосъемка четырнадцати ключевых участков, выбранных в Ленинградской области. С использованием цифровой фотограмметрической системы PHOTOMOD выполнено трансформирование аэрофотоснимков. Разработан классификатор основных типов лесных растительных сообществ, характерных для изучаемой территории. Для каждого из них определены вегетационные индексы (нормализованный разностный вегетационный индекс и вегетационный индекс, скорректированный на подстилающую поверхность); выполнено автоматизированное дешифрирование основных типов лесного растительного покрова ключевых участков, и по его результатам рассчитано экосистемное разнообразие каждого из них. В среде ГИС составлена картограмма экосистемного разнообразия ландшафтов Ленинградской области.

**Выводы.** Разработанная авторами методика может успешно применяться при проектировании природно-антропогенных систем в различных регионах с учетом специфики их физико-географических условий.

### Ключевые слова:

Вид ландшафта, экосистемное разнообразие, дистанционное зондирование, вегетационные индексы, типы лесных растительных сообществ, дешифровочные признаки, ключевой участок.

### Введение

В настоящее время оценка, учет и сохранение экосистемного разнообразия необходимы при исследовании динамики ландшафтов и планировании их преобразований. Экосистемное разнообразие характеризует возможность выполнения ландшафтами функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводства) [1–3]. Выявление потенциальных угроз для экосистемного разнообразия при проектировании антропогенной нагрузки позволит оптимизировать как размещение создаваемых объектов, так и их специализа-

цию, что даст возможность снизить уровень антропогенной трансформации ландшафтов и их деградации при осуществлении хозяйственной деятельности.

Ландшафты с низким экосистемным разнообразием, при прочих равных условиях, благоприятны для антропогенного освоения. Чем выше экосистемное разнообразие, тем больше может потребоваться ресурсов для управления функционированием объекта природопользования. Любое управление, как правило, влечет за собой подавление экосистемного разнообразия, если само по себе оно не направлено на его увеличение.

Многие исследователи отмечают, что для оценки экосистемного разнообразия целесообразно использовать данные дистанционного зондирования территории, полученные с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [4, 5]. При этом существующие методики, используемые для решения этой задачи, развиваются и требуют своего совершенствования.

При планировании исследования авторы исходили из того, что разработка методики анализа экосистемного разнообразия ландшафтов региона должна способствовать повышению качества и экологической безопасности проектируемых природно-антропогенных систем, что позволит обеспечить устойчивое (сбалансированное, бескризисное) развитие осваиваемых территорий.

#### Материал и методы

Анализ экосистемного разнообразия исследуемых ландшафтов авторы предлагают осуществлять по данным дистанционного зондирования Земли с использованием модели автоматизированного дешифрирования основных типов лесного растительного покрова по его вегетационным индексам, реализованной в среде ГИС [6, 7]. В ее основу закладываются формализованные знания о прямых дешифровочных признаках основных типов лесных растительных сообществ и логический подход к обработке фотоизображений [8–12].

Вегетационные индексы (ВИ) – показатели, характеризующие параметры растительности, которые рассчитываются для каждого пикселя снимка в разных зонах спектра [13–15]. При этом открытая почва формирует в спектральном пространстве прямую линию, называемую почвенной, которая характеризует отсутствие растительности [16]. Для определения видового состава растительности авторы предлагают использовать два вегетационных индекса: 1) нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [17] и 2) вегетационный индекс, скорректированный на подстилающую поверхность, SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) [18].

Процесс моделирования заключается в последовательном выделении и отображении контуров основных типов лесных растительных сообществ (ТЛРС) путем сравнения между собой значений ВИ, полученных по зависимостям (1), (2) с эталонными индексами, хранящимися в базе знаний.

$$R_{NDVI}^i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k R_{NDVI}^p, \quad (1)$$

$$R_{NDVI} = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED}),$$

где  $p \in [1...k]$  – количество отсчетов ВИ в выборке по всем эталонным контурам ТЛРС;  $R_{NDVI}^i$  – нормализованный разностный вегетационный индекс (НРВИ);  $R_{RED}$ ,  $R_{NIR}$  – значения отраженного растительностью света в красной и ближней инфракрасной областях спектра.

$$R_{SAVI}^i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k R_{SAVI}^p, \quad (2)$$

$$R_{SAVI} = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED} + \alpha) \cdot (1 + \alpha),$$

где  $p \in [1...k]$  – количество отсчетов ВИ в выборке по всем эталонным контурам заданных ТЛРС;  $R_{SAVI}^i$  – вегетационный индекс, скорректированный на подстилающую поверхность;  $\alpha \in [0, ..., 1]$ .

Результатом дешифрирования является карта ТЛРС исследуемой территории.

Для определения экосистемного разнообразия ключевых участков видов ландшафтов предлагается использовать индекс разнообразия Симпсона, который вычисляется по формуле [19]:

$$I_s = 1 - \sum \left( \frac{s_i}{S} \right)^2, \quad (3)$$

где  $I_s$  – индекс экосистемного разнообразия;  $s_i$  – площадь  $i$ -го типа лесного растительного сообщества, км<sup>2</sup>;  $S$  – общая площадь исследуемых лесных растительных сообществ, км<sup>2</sup>.

Значения индекса разнообразия варьируют от 0 до 1. Если индекс равен нулю, то ключевой участок ландшафта содержит в себе только одно лесное растительное сообщество и, соответственно, разнообразие отсутствует. Индекс стремится к единице при возрастании числа типов лесных растительных сообществ и при увеличении равномерности их распределения.

Полученные результаты могут быть представлены в виде серии специальных картограмм [20]. В качестве базовой основы целесообразно использовать ландшафтную карту изучаемой территории. При этом тематическое содержание создаваемых картограмм может быть выражено следующими показателями: 1) площадями ландшафтов; 2) площадями, занимаемыми основными ТЛРС в пределах ландшафтов; 3) значениями экосистемного разнообразия ландшафтов.

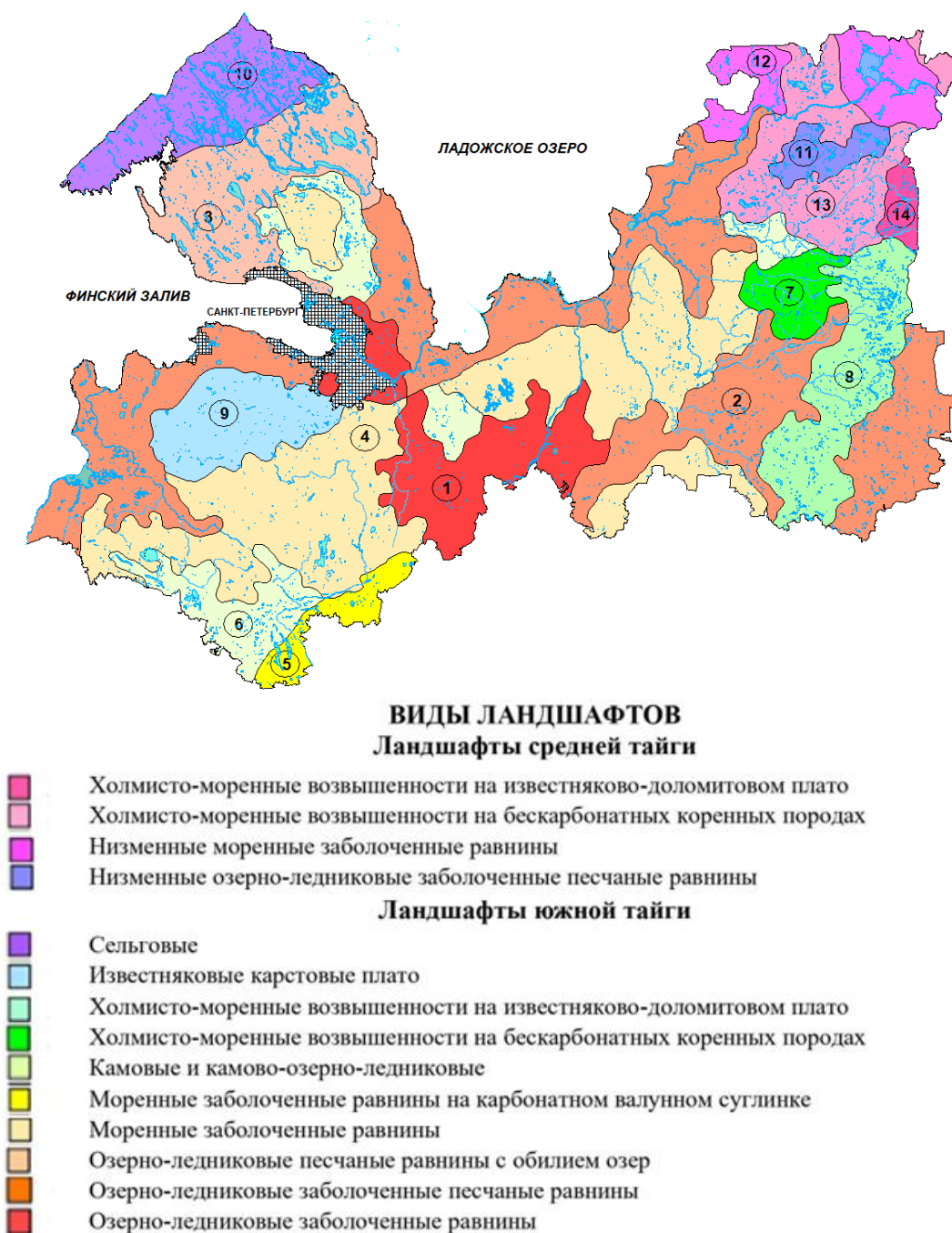
Методика, разработанная авторами, включает в себя шесть этапов: 1) выбор в каждом виде ландшафта ключевого участка; 2) аэрофотосъемка ключевых участков видов ландшафтов с использованием БПЛА; 3) создание по материалам аэрофотосъемки фотопланов на ключевые участки видов ландшафтов; 4) формирование базы знаний для автоматизированного дешифрирования типов лесных растительных сообществ ключевых участков видов ландшафтов; 5) автоматизированное дешифрирование типов лесных растительных сообществ ключевых участков видов ландшафтов и определение их экосистемного разнообразия; 6) представление полученных результатов в картографическом виде.

#### Результаты

Рассмотрим результаты апробации разработанной методики на примере ключевого участка, расположенного в пределах ландшафтов озерно-ледниковых заболоченных песчаных равнин Ленинградской области.

*Первый этап.* Ключевым участком будем называть часть территории вида ландшафта, выбранную для проведения детальных исследований растительного покрова с целью получения данных об основных ТЛРС и их использования для определения экосистемного разнообразия. Ключевой участок должен выбираться таким образом, чтобы на нем находились характерные представители основных ТЛРС, свой-

ственных изучаемому виду ландшафта. Как правило, ключевой участок выбирается в ядре вида ландшафта, приуроченном к его центру. Площадь ключевого участка, в зависимости от сложности лесного растительного покрова, может достигать ста и более квадратных километров. На рис. 1 приведена картограмма видов ландшафтов, расположенных в пределах Ленинградской области (по А.Г. Исаченко, 1983).



**Рис. 1.** Картограмма видов ландшафтов Ленинградской области

**Fig. 1.** Cartogram of landscape types in the Leningrad region

*Второй этап.* Аэрофотосъемка ключевых участков осуществлялась с использованием БПЛА, оснащенного мультиспектральной камерой Tetracam ADC Micro. Камера обеспечивает разрешение простран-

ственных данных до 10 см, имеет память 2 Гб (с возможным расширением до 8 Гб), быструю параллельную обработку данных, сверхнизкое потребление энергии, простую систему управления и контроля,

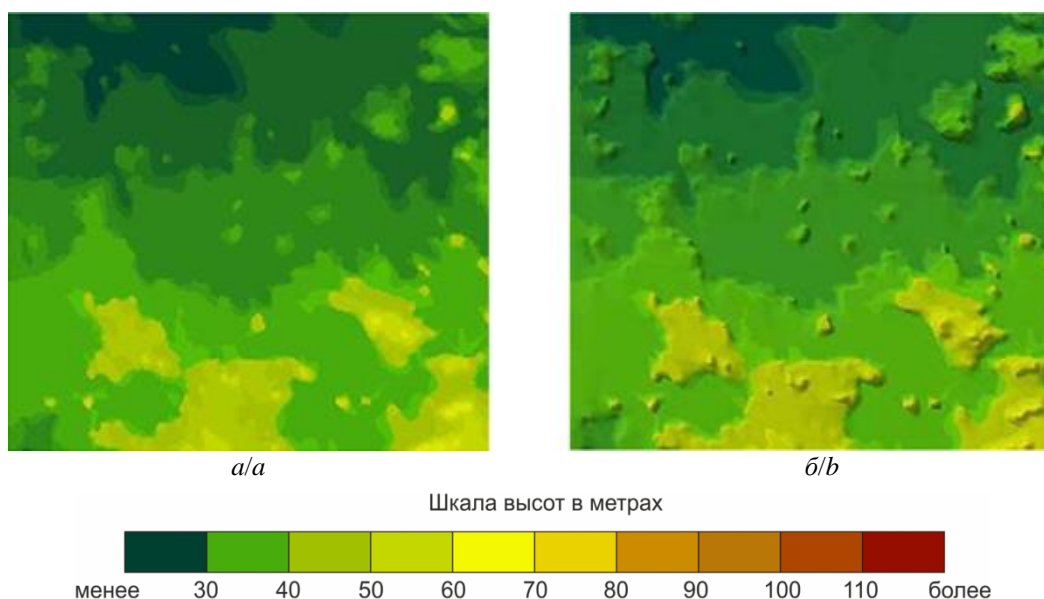


3.2 Мп матрицу, способную улавливать волны в видимом спектре длиной более 520 нм и волны в ближней инфракрасной области спектра длиной до 920 нм. Камера и поставляемое с ней программное обеспечение «PixelWrench2» хорошо подходят для получения и обработки мультиспектральных изображений посевов и лесов, а также изучения различных экосистем.

Аэрофотосъемка производилась в двух зонах спектра – красной ( $\lambda_{\text{RED}}=0,68\text{--}0,7$  мкм) и ближней инфракрасной ( $\lambda_{\text{NIR}}=0,74\text{--}1,1$  мкм) и характеризовалась следующими параметрами: перепады высот в пределах маршрутов составляли от 250 до 550 м; средняя величина продольных и поперечных пере-

крытий кадров колебалась в пределах от 28 до 96 %; ширина обзора изменялась в пределах от 170 до 380 м. Управление БПЛА выполнялось с наземного пункта управления по радиоканалам. Положение летательного аппарата во время полета фиксировалось на электронной карте, отображаемой на экране монитора.

*Третий этап.* Трансформирование отдельных снимков и объединение полученных растров в единое геоинформационное пространство выполнялось с использованием цифровой фотограмметрической системы PHOTOMOD. Для учета рельефа была построена его цифровая модель, фрагмент которой приведен на рис. 2.



**Рис. 2.** Фрагмент цифровой модели рельефа, созданной на исследуемый ключевой участок (а – без отмывки; б – с отмывкой)

**Fig. 2.** Fragment of a digital terrain model created for the key area under study (a – without washing; b – with washing)

В качестве картографической основы для создания цифровой модели рельефа использовалась топографическая карта масштаба 1:50000. Шаг дискретизации цифровой модели составлял 30 м. Ее создание осуществлялось в среде ГИС «Карта 2011».

Трансформирование снимков осуществлялось аналитическим методом, основанным на использовании коллинеарных уравнений, описывающих закон построения изображения для одиночного снимка в центральной проекции [21]. Точность трансформирования при высоте сечения рельефа 5 м составила 8 м для равнинных участков местности и 10 м для холмистых.

Результатом работ явились координатно-привязанные фотопланы на ключевые участки видов ландшафтов в виде двух геометрически идентичных, но различных по спектральным образам, трансформированных изображений.

*Четвертый этап.* Для систематизации информации об основных ТЛРС был разработан их классификатор с использованием фондовых материалов ландшафтных исследований, данных лесоустроительной документации и лесного кадастра. В качестве объектов классификатора были приняты следующие типы

лесных растительных сообществ: 1) сосновые сухие леса; 2) сосновые избыточно увлажненные леса; 3) елово-сосновые сухие леса; 4) елово-березовые сухие леса; 5) елово-березовые избыточно увлажненные леса; 6) березовые сухие леса; 7) редкостойные угнетенные заболоченные леса; 8) луга; 9) болота.

Для ТЛРС, входящих в классификатор, были определены следующие показатели: нормализованный разностный вегетационный индекс (1) и вегетационный индекс, скорректированный на подстилающую поверхность (3).

*Пятый этап.* Автоматизированное дешифрирование основных ТЛРС в пределах ключевых участков ландшафтов осуществлялось с использованием программного обеспечения, разработанного специалистами военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Дешифрирование заключалось в последовательном выделении их контуров путем сравнения, рассчитанных по фотоизображению значений ВИ с индексами, хранящимися в базе знаний [22, 23], и сегментации полученной информации. Процесс сегментации в программном обеспечении реализован следующим образом. Методом «ближай-



ших соседей» выполняется предварительная сегментация областей в матрице НРВИ с равными индексами с установлением принадлежности выделенного кластера ТЛРС. В результате чего формируется набор картограмм, элементами которых являются коды ТЛРС. Для оконтуривания каждого массива кодов используется метод «наименьшего однородного сегмента, ассимилируемого ядром». Отслеживание контура осуществляется путем перемещения окна по границе ядра вдоль контура объекта и проверки площади захвата на каждом шаге. Изменение направления перемещения окна выполняется в случае уменьшения площади более чем на 10 %.

Для оценки точности дешифрирования была составлена матрица, в которой классы типов лесной растительности, полученные по аэрофотоснимкам, сравнивались с классами, полученными по материалам полевого обследования (4).

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{N} \times 100, \quad (4)$$

где  $Q$  – обобщенный показатель точности автоматизированного дешифрирования растительных сообществ по аэрофотоснимкам;  $D_i$  – значение  $i$ -го диагонального элемента;  $n$  – общее количество диагональных элементов;  $N$  – общее количество анализируемых образов.

Процент совпадения классов от общего количества анализируемых образов был принят в качестве значения точности автоматизированного дешифрирования.

Обобщенный показатель точности автоматизированного дешифрирования основных ТЛРС ключевых участков составил 85,3 %, т. е. в 85 случаях из 100 отдешифрированные основные ТЛРС совпадали с реальными сообществами.

В качестве примера на рис. 3 приведен фрагмент картограммы основных ТЛРС исследуемого ключевого участка, составленной по фотоплану.

По созданной картограмме были определены площади основных ТЛРС исследуемого ключевого участка (таблица).

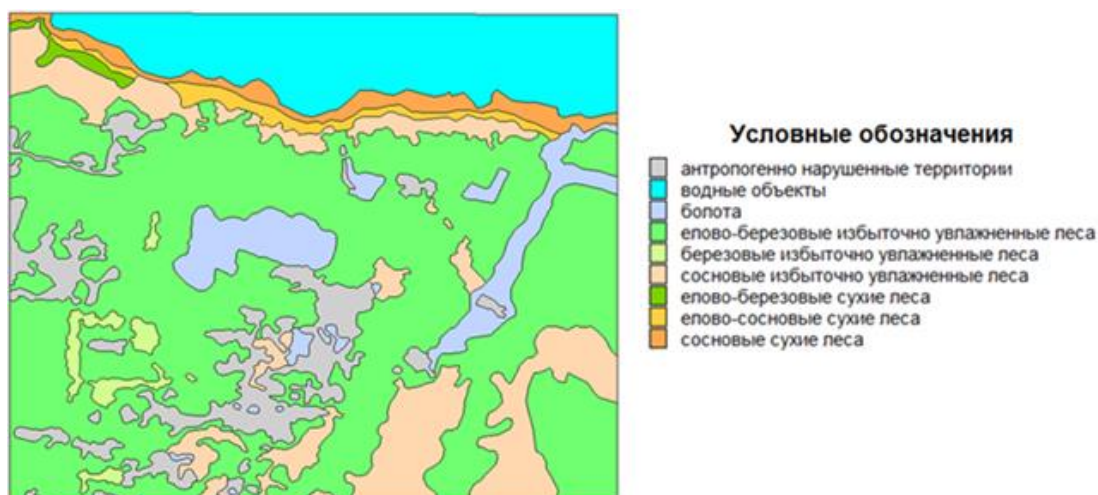


Рис. 3. Фрагмент картограммы основных ТЛРС исследуемого ключевого участка, составленный по фотоплану

Fig. 3. Fragment of the cartogram of the main types of forest plant communities (TFPC) of the key area under study, compiled from the photoplane

Таблица. Площади основных ТЛРС исследуемого ключевого участка

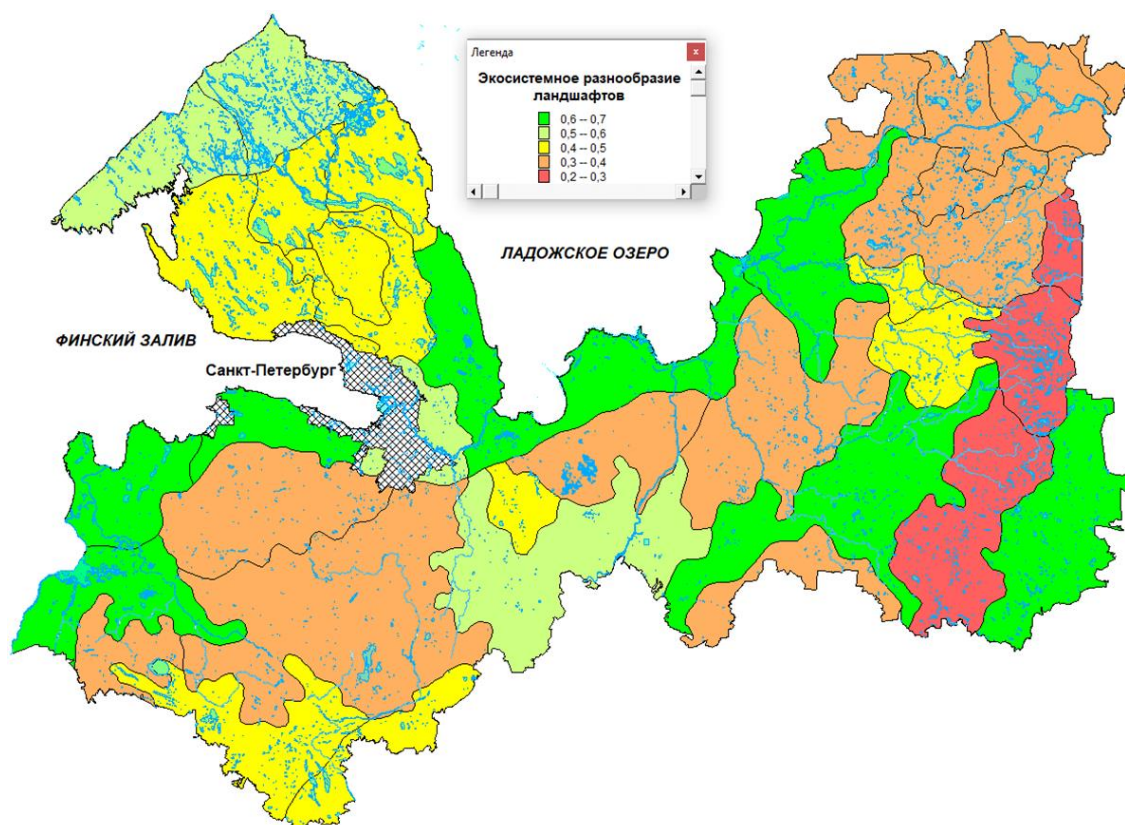
Table. Areas of the main TFPC of the key area under study

Коды типов Type code	Название основных ТЛРС Name of the main TFPC	Площади типов, км <sup>2</sup> Type areas, km <sup>2</sup>
1	Сосновые сухие леса Dry pine forests	5,34
2	Елово-сосновые сухие леса Spruce-pine dry forests	3,44
3	Елово-березовые сухие леса Spruce-birch dry forests	1,44
4	Сосновые избыточно увлажненные леса Pine forests with excessive moisture	11,87
5	Березовые избыточно увлажненные леса Birch over-humidified forests	2,27
6	Елово-березовые избыточно увлажненные леса Spruce-birch over-humidified forests	38,45
7	Болота Swamps	6,38
Общая площадь основных ТЛРС на исследуемом ключевом участке Total area of the main TFPC in the key area under study		69,17

Для определения экосистемного разнообразия ключевых участков видов ландшафтов была использована формула (3). Для исследуемого ключевого участка экосистемное разнообразие составило 0,64.

*Шестой этап.* После определения экосистемного разнообразия ключевых участков видов ландшафтов

всем индивидуальным ландшафтам, входящим в соответствующие виды, присваиваются вычисленные значения экосистемного разнообразия и на этой основе создаются картограммы экосистемного разнообразия ландшафтов (рис. 4).



**Рис. 4.** Картограмма экосистемного разнообразия ландшафтов Ленинградской области

**Fig. 4.** Cartogram of ecosystem diversity of landscapes of the Leningrad region

### Закключение

Рассмотренная выше методика позволяет получать актуализированную информацию об экосистемном разнообразии ландшафтов изучаемого региона. Заложенные в ее основу подходы базируются на исследованиях, проведенных авторами с 2013 г. по настоящее время [23–25], которые были доложены на всероссийских и международных конференциях, где получили поддержку и одобрение.

В предыдущих исследованиях внимание авторов было сосредоточено на отдельных аспектах данной работы, включая: разработку научно-методических основ анализа экосистемного разнообразия [23], использование беспилотных летательных аппаратов для изучения зеленых насаждений [25], разработку подходов к ландшафтно-экологическому районированию земель [24].

В данной статье на основе обобщения результатов ранее выполненных авторами работ сформулированы теоретические положения анализа экосистемного разнообразия ландшафтов региона и приведены подходы к его практическому применению. Полученные авторами результаты полностью соответствуют цели и задачам исследования.

Рассматриваемой тематике посвящены работы [8, 19]. В работе [8] для оценки экосистемного разнообразия используется картографическая информация. Этот подход интересен, однако он зачастую трудно реализуем из-за отсутствия актуализированных крупномасштабных карт об экосистемном строении изучаемой территории. В работе [19] автор рассматривает особенности не экосистемного, а ландшафтного разнообразия.

Разработанная авторами методика была успешно апробирована при геоэкологической оценке пригодности территории Киришского муниципального района Ленинградской области для рекреационного освоения [26]. Результаты апробации доказали работоспособность методики и возможность ее применения при проектировании природно-антропогенных систем в различных регионах с учетом специфики их физико-географических условий; при решении оптимизационных эколого-экономических задач природопользования; при выполнении землеустроительных работ и при разработке схем территориального планирования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00683-а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Факторы формирования ландшафтного разнообразия природного парка «Предгорье Алтая» и пути его сохранения / О.Н. Барышникова, И.Н. Ротанова, М.М. Силантьева, Н.Ф. Харламова // *ActaBiologicaSibirica*. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 23–31.
2. Огуреева Г.Н. Экосистемное и биотическое разнообразие Прикаспийского региона // *Юг России: экология, развитие*. – 2018. – Т. 13. – № 4. – С. 8–23. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-4-8-23.
3. Ковязин В.Ф., Кан К.Х., Фам Т.К. Оценка видового состава древесных растений в ландшафтах Павловского парка Санкт-Петербурга // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2017. – № 5. – С. 82–91. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.82.
4. Черненькова Т.В. Оценка биоразнообразия лесов наземными и дистанционными методами на основе ГИС-технологий // *Биосфера*. – 2009. – № 1. – С. 129–136.
5. Everaerts J. The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for remote sensing and mapping // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Congress), XXXVII (B1)*. – Beijing, China, 2008. – P. 1187–1192.
6. Foody G.M. GIS: biodiversity applications // *Progress in Physical Geography*. – 2008. – V. 32 (2). – P. 223–235.
7. Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use / J.P. Geyer, D.M. Stoms, F.W. Davis, B. Wittstock // *International Journal of Life Cycle Assessment*. – 2010. – V. 15. – P. 692–703.
8. Колбовский Е.Ю., Есипова Е.С. Геоинформационное моделирование ландшафтных местоположений и элементарных водосборов для оценки потенциального биоразнообразия лесной зоны Дальнего Востока // *Геодезия и картография*. – 2017. – № 1. – С. 25–34.
9. Малых О.Ф. К оценке индикаторов экосистемного разнообразия горнотаёжных сосняков южносибирского типа Забайкальского края // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 8. – С. 160–165.
10. Ji L., Peters A.J. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function // *Remote Sensing of Environment*. – 2007. – V. 106 (1). – P. 59–65.
11. Geostatistical estimation of signal-to-noise ratios for spectral vegetation indices / J. Lei, L. Zhang, J. Rover, B.K. Wylie, X. Chen // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2014. – V. 96. – P. 20–27.
12. Le Maire G., Francois C., Dufrene E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements // *Remote Sensing of Environment*. – 2004. – V. 89. – P. 1–28.
13. Братков В.В. Атаев З.В. Вегетационные индексы и их использование для картографирования горных ландшафтов Российского Кавказа // *APRIORI. Серия: Естественные и технические науки*. – 2017. – № 1. – С. 1–21.
14. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // *Геоматика*. – 2009. – № 3. – С. 1–5.
15. The interpretation of spectral vegetation indexes / R.B. Myneni, F.G. Hall, P.J. Sellers, A.L. Marshak // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1995. – V. 33. – Iss. 2. – P. 481–486.
16. Richardson A.J., Wiegand C.L. Distinguishing vegetation from soil background information // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1977. – V. 43. – Iss. 12. – P. 1541–1552.
17. Elvidge C.D., Lyon R.J.P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // *Remote Sensing of Environment*. – 1985. – V. 17. – P. 265–269.
18. Huete A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – V. 25. – P. 295–309.
19. Соколов А.С. Картографический анализ региональных особенностей ландшафтного разнообразия Белоруссии // *Псковский регионологический журнал*. – 2016. – № 4 (28). – С. 59–70.
20. Васильев О.Д., Чистов С.В. Исследование и картографирование экологических функций лесов Московского региона: методика и результаты // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. – 2018. – Т. 24. – № 1. – С. 348–367.
21. Тимофеев В.Г. Использование дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов для оперативного выявления изменений местности // *Тезисы докладов научно-технической конференции ФГУП «РНИИ КП», посвященной 60-летию предприятия*. – М., 10–12 октября 2006. – С. 310–312.
22. Волгушева Н.Э., Прокофьев Н.А., Бляхарский Д.П. Технология расчета вегетационного индекса на основании данных беспилотной аэрофотосъемки // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2016. – № 2. – С. 71–76.
23. Осипов А.Г., Тимофеев В.Г. Научно-методические основы определения экологически допустимого уровня освоения природных ландшафтов при создании природно-аграрных систем // *Информация и космос*. – 2015. – № 2. – С. 85–95.
24. Ландшафтно-экологическое районирование и мониторинг земель Ленинградской области / Н.В. Арефьев, В.В. Гарманов, А.Г. Осипов, В.Е. Трушников // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2013. – № 11. – С. 303–311.
25. Мониторинг зеленых насаждений с применением беспилотных летательных аппаратов / В.Ф. Ковязин, В.Л. Богданов, В.В. Гарманов, А.Г. Осипов // *Аграрный научный журнал*. – 2016. – № 4. – С. 14–19.
26. Осипов А.Г., Долгова М.П. Геоэкологическая оценка пригодности территории Будогощского городского поселения Киришского муниципального района Ленинградской области для рекреационного освоения // *Информация и космос*. – 2014. – № 3. – С. 72–79.

Поступила: 09.03.2020 г.

## Информация об авторах

**Осипов А.Г.**, кандидат географических наук, доцент кафедры картографии Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского.

**Дмитриев В.В.**, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета.

**Ковязин В.Ф.**, доктор биологических наук, профессор кафедры инженерной геодезии, Санкт-Петербургский горный университет.

UDC 502.5

## METHODS OF ANALYZING LANDSCAPE ECOSYSTEM DIVERSITY OF A REGION BASED ON REMOTE SENSING

Alexey G. Osipov<sup>1</sup>,  
zoyaks@yandex.ru

Vasiliy V. Dmitriev<sup>2</sup>,  
vasiliy-dmitriev@rambler.ru; v.dmitriev@spbu.ru

Vasily F. Kovyazin<sup>3</sup>,  
vfkedr@mail.ru

<sup>1</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,  
13, Zhdanovskaya street, St. Petersburg, 195279, Russia.

<sup>2</sup> St. Petersburg State University,  
7/9, Universitetskaya embankment, St. Petersburg, 199034, Russia.

<sup>3</sup> St. Petersburg Mining University,  
2, Vasilyevsky Island 21 line, St. Petersburg, 199026, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to preserve the resource- and environment-reproducing functions of landscapes during their anthropogenic development. One of the factors contributing to the resilience of landscapes to anthropogenic loads is their ecosystem diversity. Currently, cartographic modeling methods are widely used in practice to determine ecosystem diversity, but they are not effective enough due to the lack of updated large-scale cartographic information about the ecosystem structure of the studied landscapes.

**The aim** of the research is to develop a methodology for analyzing the ecosystem diversity of the region's landscapes using remote sensing materials and to test it on the territory of the Leningrad region.

**Objects:** ecosystem diversity of landscapes.

**Methods:** remote sensing of landscapes; construction of digital terrain models in the GIS environment; automated interpretation of soil and vegetation cover; statistical data processing, aerial surveys; cartographic generalizations; regional landscape and environmental analysis using GIS.

**Results.** The expediency of using remote sensing materials to assess the ecosystem diversity of the region's landscapes is substantiated. A model of automated interpretation of the main types of forest vegetation cover based on its vegetation indices is developed; an approach to determining ecosystem diversity based on the materials of automated interpretation of the main types of forest vegetation cover is proposed. Aerial photography of fourteen key sites selected in the Leningrad region was performed using an unmanned aerial vehicle. Aerial photos were transformed using the digital photogrammetric system PHOTOMOD. A classifier of the main types of forest plant communities characteristic of the study area was developed. Vegetation indices were determined for each of them (normalized difference vegetation index and vegetation index adjusted for the underlying surface); automated decoding of the main types of forest vegetation cover in key areas was performed and the ecosystem diversity of each of them was calculated based on its results. In the GIS environment, a cartogram of the ecosystem diversity of the landscapes of the Leningrad region was compiled.

**Summary.** The method developed by the authors can be successfully applied in the design of natural and anthropogenic systems in various regions, taking into account the specifics of their physical and geographical conditions.

### Key words:

Landscape type, ecosystem diversity, remote sensing, vegetation indices, types of forest plant communities, decoding features, key site.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 19-05-00683-a.

### REFERENCES

1. Baryshnikova O.N., Rotanova I.N., Silantieva M.M., Kharlamova N.F. Factors of formation of landscape diversity of the natural Park «Foothills of Altai» and ways of its preservation. *ActaBiologicaSibirica*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 23–31. In Rus.
2. Ogureeva G.N. Ecosystem and biotic diversity of the Caspian region] *South of Russia: ecology and development. Kamerton publishing house*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 8–23. In Rus. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-4-8-23.
3. Kovyazin V.F., Kan K.H., Pham T.K. Assessment of the species composition of woody plants in the landscapes of Pavlovsk Park in Saint Petersburg. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2017, no. 5, pp. 82–91. In Rus. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.82.
4. Chernenkova T.V. Otsenka bioraznoobraziya lesov nazemnymi i distantsionnymi metodami na osnove GIS-tekhnologiy [Assessment of forest biodiversity by ground and remote methods based on GIS technologies]. *Biosfera*, 2009, no. 1, pp. 129–136.
5. Everaerts J. The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for remote sensing and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (ISPRS Congress), XXXVII (B1). Beijing, China, 2008. pp. 1187–1192.
6. Foody G.M. GIS: biodiversity applications. *Progress in Physical Geography*, 2008, vol. 32 (2), pp. 223–235.
7. Geyer J.P., Stoms D.M., Davis F.W., Wittstock B. Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, vol. 15, pp. 692–703.
8. Kolbowski E.J., Esipova E.S. Geoinformation modeling of landscape locations and elementary catchments to assess the potential biodiversity of the forest zone of the Far East. *Geodesy and cartography*, 2017, no. 1, pp. 25–34. In Rus.

9. Malyh O.F. To assess indicators of ecosystem diversity of mountain taiga pine forests of the South Siberian type of the TRANS Baikal territory. *Successes of modern natural science*, 2018, no. 8, pp. 160–165. In Rus.
10. Ji L., Peters A.J. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function. *Remote Sensing of Environment*, 2007, vol. 106 (1), pp. 59–65.
11. Lei J., Zhang L., Rover J., Wylie B.K., Chen X. Geostatistical estimation of signal-to-noise ratios for spectral vegetation indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, vol. 96, pp. 20–27.
12. Le Maire G., Francois C., Dufrene E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 89, pp. 1–28.
13. Bratkov V.V., Ataev Z.V. Vegetatsionnye indeksy i ikh ispolzovanie dlya kartografirovaniya gornyykh landshaftov Rossiyskogo Kavkaza [Vegetation indices and their use for mapping mountain landscapes of The Russian Caucasus]. *APRIORI. Series: Natural and technical Sciences*, 2017, no. 1, pp. 1–21.
14. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spektralnye svoystva rastitelnosti i vegetatsionnye indeksy [Spectral properties of vegetation and vegetation indices]. *Geomatic*, 2009, no. 3, pp. 1–5.
15. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, vol. 33, no. 2, pp. 481–486.
16. Richardson A.J., Wiegand C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, vol. 43, no. 12, pp. 1541–1552.
17. Elvidge C.D., Lyon R.J. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote Sensing of Environment*, 1985, vol. 17, pp. 265–269.
18. Huete A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, vol. 25, pp. 295–309.
19. Sokolov A.S. Cartographic analysis of regional features of landscape diversity in Belarus. *Pskov regionological journal*, 2016, no. 4 (28), pp. 59–70. In Rus.
20. Vasiliev O.D., Chistov S.V. Research and mapping of ecological functions of forests in the Moscow region: methods and results. *InterCarto. InterGis*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 348–367. In Rus.
21. Timofeev V.G. Ispolzovanie distantsionno-pilotiruemykh letatelnykh apparatov dlya operativnogo vyyavleniya izmeneniy mestnosti [Use of remotely piloted aircraft for rapid detection of terrain changes]. *Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii RNII KP, posvyashchennoy 60-letiyu predpriyatiya* [Abstracts of the scientific and technical conference of RNII KP dedicated to the 60<sup>th</sup> anniversary of the enterprise]. Moscow, October 10–12, 2006. pp. 310–312.
22. Volgusheva N.E., Prokofiev N.A., Blacharski D.P. Technology for calculating the vegetation index based on data from unmanned aerial photography. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2016, no. 2, pp. 71–76. In Rus.
23. Osipov A.G., Timofeev V.G. Nauchno-metodicheskie osnovy opredeleniya ekologicheskoi dopustimogo urovnya osvoeniya prirodnnykh landshaftov pri sozdani prirodno-agrarnykh sistem [Scientific and methodological basis for determining the environmentally acceptable level of development of natural landscapes when creating natural and agricultural systems]. *Information and space*, 2015, no. 2, pp. 85–95.
24. Arefyev N.V., Garmanov V.V., Osipov A.G., Trushnikov V.E. Landshaftno-ekologicheskoe rayonirovanie i monitoring zemel Leningradskoy oblasti [Landscape and environmental zoning and monitoring of land in the Leningrad region]. *Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, no. 11, pp. 303–311.
25. Kovyazin V.F., Bogdanov V.L., Garmanov V.V., Osipov A.G. Monitoring zelenykh nasazhdeniy s primeneniem bespilotnykh letatelnykh apparatov [Monitoring of green plantations with the use of unmanned aerial vehicles]. *Agricultural scientific journal*, 2016, no. 4, pp. 14–19.
26. Osipov A.G., Dolgova M.P. Geoekologicheskaya otsenka prigodnosti territorii Budogoschskogo gorodskogo poseleniya Kirishskogo munitsipalnogo rayona Leningradskoy oblasti dlya rekreatsionnogo osvoeniya [Geoecological assessment of the suitability of the site Budogoshch urban settlement of Kirishi municipal district of Leningrad region for recreational use]. *Information and space*, 2014, no. 3, pp. 72–79.

Received: 9 March 2020.

#### Information about the authors

**Alexey G. Osipov**, Cand. Sc., associate professor, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky.

**Vasily V. Dmitriev**, Dr. Sc., professor, St. Petersburg State University.

**Vasily F. Kovyazin**, Dr. Sc., professor, St. Petersburg Mining University.



УДК 504.054

## ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ Г. БЕРЕЗНИКИ, ПЕРМСКИЙ КРАЙ): СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ

Ушакова Евгения Сергеевна<sup>1</sup>,  
ushakova.evgeniya@gmail.com

Караваева Татьяна Ивановна<sup>1</sup>,  
jewel\_@list.ru

Белкин Павел Андреевич<sup>1</sup>,  
pashabelkin@mail.ru

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Генкеля, 4.

**Актуальность.** Интенсивное антропогенное воздействие на окружающую среду, особенно в пределах промышленных территорий, способствует деградации почвенного профиля и аккумуляции технофильных химических элементов в почвенном покрове. Увеличение загрязнения городских почв тяжелыми металлами в связи с интенсивной промышленной нагрузкой является серьезной экологической проблемой. Несмотря на повышенный интерес к экологическому состоянию почв промышленных территорий, существующая в настоящее время в Российской Федерации система нормирования недостаточно разработана и не позволяет дать точную характеристику загрязнения.

**Цель:** определение уровня загрязнения тяжелыми металлами почв в пределах промышленной зоны урбанизированной территории; сравнение отечественных и зарубежных методов оценки загрязненности почв и обоснование необходимости актуализации нормативно-технической документации.

**Методы.** Содержание тяжелых металлов в почвах определено масс-спектральным методом на базе сектора наноминералогии «Центра коллективного пользования Пермского государственного национального исследовательского университета».

**Результаты и выводы.** Рассмотрены отечественные и зарубежные методы оценки экологического состояния почв. Проведена оценка уровня загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами в пределах промышленных территорий крупных химических предприятий Пермского края с использованием отечественных и зарубежных нормативов качества почв, суммарных показателей загрязнения и индекса потенциального экологического риска. Показана необходимость учета функционального назначения территорий при оценке загрязнения с помощью индивидуальных показателей. Получены аналогичные результаты оценки степени загрязнения почв при использовании отечественных, не регламентированных нормативно-технической документацией, и зарубежных суммарных показателей. Сделан вывод о необходимости актуализации нормативных требований Российской Федерации с учетом отечественного и зарубежного опыта оценки загрязненности почв.

### Ключевые слова:

Нормативы качества почв, тяжелые металлы, уровень загрязнения почв, промышленные территории, суммарный показатель загрязнения, индекс потенциального экологического риска.

### Введение

Интенсивное антропогенное воздействие на окружающую среду, особенно в пределах промышленных территорий, способствует деградации почвенного профиля и аккумуляции технофильных химических элементов в почвенном покрове. Почва, аккумулируя поступающие загрязняющие вещества, неизбежно оказывает влияние на сопредельные среды, выступая источником вторичного загрязнения атмосферного воздуха, природных вод, биотического комплекса.

Согласно ежегодным докладам и проведенным исследованиям в почвах российских городов за последнюю четверть века зафиксированы повышенные концентрации Hg, Zn, Sn, Mn в зонах промышленности и автотранспорта, при этом наблюдается увеличение контрастности техногенных геохимических аномалий (Cu, Mo, As, Co и Cd) рядом с промышленными предприятиями, автомобильными и железными дорогами. Очаги геохимической нагрузки часто обусловлены осаждением в почвенном субстрате остаточных ингредиентов-микропримесей, содержащихся в нефти: V, Ni, Co, Hg, As, Cd и др. [1–4].

Увеличение загрязнения городских почв тяжелыми металлами в связи с интенсивной промышленной нагрузкой является серьезной экологической проблемой крупных промышленных центров (табл. 1).

Установлено, что в городских почвах по сравнению с фоновыми почвами увеличивается подвижность металлов. Многолетние наблюдения в зонах влияния крупных промышленных предприятий фиксируют динамику прироста загрязненности почв тяжелыми металлами, что приводит к необходимости создания расширенных санитарно-защитных зон вокруг промышленных предприятий [7, 8].

Несмотря на повышенный интерес к экологическому состоянию почв промышленных территорий при научных исследованиях и необходимость почвенных исследований, обусловленную градостроительными, природоохранными и санитарными нормами, при проектировании, строительстве и реконструкции объектов существующая в настоящее время в Российской Федерации система нормирования недостаточно разработана и не позволяет дать точную характеристику загряз-

нения [11–21]. Исследователи отмечают отсутствие градации по функциональному назначению территорий [20]. В СанПиН 2.1.7.1287-03 «Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы» (п. 4.4) функциональное использование территории учитывается только при определении перечня загрязнителей, а оценка загрязненности и последующее определение возможности дальнейшего использования почв выполняются без учета характера землепользования. При оценке степени загрязнения не учитываются техногенные и природные, обусловленные литолого-геохимическими особенностями территории, доли со-

держания элементов; различия в токсичности загрязняющих веществ при определении суммарного показателя загрязнения; последствия совместного воздействия на человека различных химических элементов [12]. При оценке экологического состояния почв рекомендуется использовать дополнительные критерии: подвижность металлов, биодоступность, чувствительность почвенной биоты и растительности, а комплексную оценку загрязненности проводить с использованием интегрального оценочного балла, отражающего совокупное действие тяжелых металлов с учетом степени их опасности для окружающей среды [10].

**Таблица 1.** Концентрации элементов в почвах промышленных территорий

**Table 1.** Concentrations of elements in industrial areas soils

Элементы Elements	Острава, Чехия [5] Ostrava, Czech Republic [5]	Гебзе, Турция [6] Gebze, Turkey [6]	Красноярск, Россия [7] Krasnoyarsk, Russia [7]	Благовещенск, Россия [8] Blagoveshchensk, Russia [8]	Ростов-на-Дону, Россия [9] Rostov-on-Don, Russia [9]	Нижний Новгород, Россия [10] Nizhny Novgorod, Russia [10]
Ni	–	–	5,94	6–62	50–60	4,9–42,8
Cu	13,88–90,66	7,87–725	4,0	10–72	50–150	7,1–62,1
As	–	1,5–65,60	3,6	–	4,1–6,1	–
Hg	0,13–1,31	9,00–2721	2,0	–	0,012–0,04	–
Cd	0,06–1,18	0,05–176	2,76	0,06–7,80	0,1–0,53	0,05–0,28
Pb	17,03–174,24	17,07–8469	39,16	22,4–311	20–60	7,0–66,4
Zn	85,16–373,58	29,50–10000	32	32–739	200–500	41,5–239,5

В соответствии с санитарно-гигиеническим ГОС-Том 17.4.1.02-83 к опасным химическим веществам, попадающим в почву из выбросов, сбросов, отходов, относятся мышьяк, кадмий, ртуть, селен, свинец, цинк, фтор, бенз(а)пирен – первого класса опасности; бор, кобальт, никель, молибден, медь, сурьма, хром – второго класса; барий, ванадий, вольфрам, марганец, стронций, ацетофенон – третьего класса. При этом ПДК и ОДК приняты только для 14 из всех перечисленных веществ.

Зарубежные подходы к оценке загрязненности почв более разнообразны по сравнению с отечественными. Стандарты содержания загрязняющих веществ в почвах устанавливаются для территорий с различными видами хозяйственного использования: пахотные земли, постоянные пастбища, жилые районы, детские площадки, парки и зоны рекреации, промышленные и коммерческие зоны [18, 19, 22, 23]. Эти значения могут быть дифференцированы в зависимости от состава и pH почвы [17] и обоснованы для большего перечня химических элементов [14].

Совершенно очевидным представляется необходимость актуализации нормативно-технической документации, регламентирующей оценку загрязненности почв, с учетом отечественного и зарубежного опыта.

Целью работы является сравнение отечественных и зарубежных методов оценки загрязненности почв и обоснование необходимости актуализации нормативно-технической документации.

В задачи исследований входила оценка состояния почв промышленных территорий в пределах санитарно-защитных зон двух крупных химических предприятий Пермского края и анализ результатов оценки при использовании отечественных и зарубежных методов.

#### Территория исследования

Город Березники расположен в северной части Пермского края и является крупным промышленным центром. Объектом исследования являются почвы промышленных территорий г. Березники (рис. 1). Промышленное освоение данной территории началось с 1883 г. на базе соляных промыслов при Березниковском содовом заводе. Промышленная зона располагается в левобережной части бассейна р. Камы. В настоящее время в пределах промзоны города расположены крупные предприятия: филиал «Азот» АО «ОХК «Уралхим», АО «Березниковский содовый завод», Березниковская ТЭЦ, ОАО «Сода-Хлорат», городские очистные сооружения. На всем протяжении промзоны присутствует промканал, в который осуществляется выпуск сточных вод промышленных предприятий.

Территория пересечена сетью автомобильных и железных дорог, необходимых для функционирования предприятий, практически вся площадь спланирована и покрыта твердой водонепроницаемой поверхностью (промышленная зона, асфальтированные дороги и проезды, производственные здания и территории).

Территория исследований испытывает значительную техногенную нагрузку со стороны промышленных предприятий. Установлено, что в 2018 г. основной вклад в суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников вносили 10 предприятий Пермского края из них на территории Березниковского городского округа: филиал «Азот» АО ОХК «УРАЛХИМ» в г. Березники (1,08 %), АО «Березниковский содовый завод» (2,7 %) [24].



**Рис. 1.** Расположение района исследований на территории Российской Федерации  
**Fig. 1.** Research area location on the territory of the Russian Federation

#### Исходные данные

Техногенные аномалии в почвенном покрове, связанные с выпадением загрязняющих веществ из атмосферы, образуются в самой верхней части почвенного профиля. Накопление тяжелых металлов техногенного происхождения в приповерхностном слое почвы объясняется тем, что основная их часть поступает в форме труднорастворимых или нерастворимых соединений, происходит их накопление в твердой фазе, что, прежде всего, выражается в увеличении их валового содержания [25].

Пространственное расположение и профильное строение почв являются совокупным результатом действия современных факторов почвообразования, в том числе антропогенного, а также наследия лито- и педогенеза. Структура почвенного покрова территории современных городов претерпела существенные изменения: появились новые почвы (урбостратоземы), техногенные поверхностные образования (в том числе целенаправленно созданные), которые в той или иной степени выполняют функции почв. Они зачастую не связаны между собой длительными почвенно-геохимическими процессами, ведущим фактором их образования является характер антропогенного воздействия. Почвенный покров характеризуется частой сменой почв и техногенных поверхностных образований и высокой степенью их контрастности. В силу высокой горизонтальной и вертикальной неоднородности почвенного покрова в основу представлений об его организации положено понятие урбопедагомкомплексов – комбинации почв и техногенных поверхностных образований на одинаковых почвообразующих породах в пределах определенной функциональной зоны [25]. На исследованной территории почвы представлены урбостратоземами супесчаного и песчаного состава, имеют выраженные признаки деградации: почвенный покров уплотнен, полноценная

субстанция отсутствует, присутствуют мелкие камни, осколки стекла.

Учитывая преимущественную аккумуляцию загрязняющих веществ в приповерхностном слое, отбор проб почв осуществлялся с глубины 0–20 см методом комплексной пробы на реперных участках (РУ) в пределах промышленной и санитарно-защитной зон промышленных предприятий г. Березники в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа». Для оценки загрязненности почв принят перечень тяжелых металлов и металлоидов, регламентированный СанПиН 2.1.7.1287-03 в качестве стандартного: свинец, кадмий, цинк, медь, никель, мышьяк, ртуть.

Лабораторные исследования проводились на базе сектора наноминералогии «Центра коллективного пользования Пермского государственного национального исследовательского университета». Содержание микроэлементов в пробах почв определяли масс-спектральным методом на приборе BRUKER AURORA M90 ICP-MS. Разложение образцов почв проводили путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа использовали навески образцов массой 0,1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводили разложение контрольных образцов (холостых проб) и одного стандартного образца. Для проверки правильности анализа образца использовали стандартные образцы Института Геохимии СО РАН (Иркутск): химического состава донного ила озера Байкал БИЛ-1 (ГСО 7126-94), карбонатно-силикатные рыхлые отложения СГХМ-1,2,3,4 (ГСО 3483-86, 3484-86, 3485-86, 3486-86), горные породы трапп СТ-2а (ГСО 8671-2005), габбро эссекситовое СГД-2а (ГСО 8670-2005).

Расположение реперных участков опробования обусловлено границами промышленной зоны города. Количество реперных участков составило 10. В каче-



стве фоновой была выбрана территория, удаленная от зоны влияния крупных промышленных предприятий, покрытая условно-естественной растительностью. Почвенный покров представлен аллювиальными почвами со щелочной реакцией среды, легкого механического состава, соответствующего составу оцениваемых почв. Фоновое содержание элементов получено усреднением значений четырех фоновых проб.

#### Существующие методические подходы к оценке загрязненности почв

Эффективная оценка загрязнения почв тяжелыми металлами заключается в выборе подходящих компонентов загрязнения и методов оценки с целью выявления реальной геохимической обстановки на исследуемой территории. С помощью комплексирования различных методов оценки можно оценить степень накопления тяжелых металлов в почвах, а также уро-

вень загрязнения. На сегодняшний день известно более 25 зарубежных и российских методов оценки загрязненности почв [26–35]. Часто используемые индексы можно разделить на две группы: индивидуальные и общие комплексные (рис. 2). С помощью индексов загрязнения можно оценить состояние качества почвы с указанием класса опасности или уровня загрязнения. При комплексировании различных методов оценки необходимо учитывать слабые и сильные стороны каждого метода.

Согласно опубликованным данным, зарубежные авторы предпочитают использовать индекс геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ), коэффициент обогащения (EF), поскольку эти показатели считаются самыми полезными и универсальными [31, 36–47]. Данные показатели позволяют оценить загрязнение почв отдельным элементом с учетом его фонового значения.

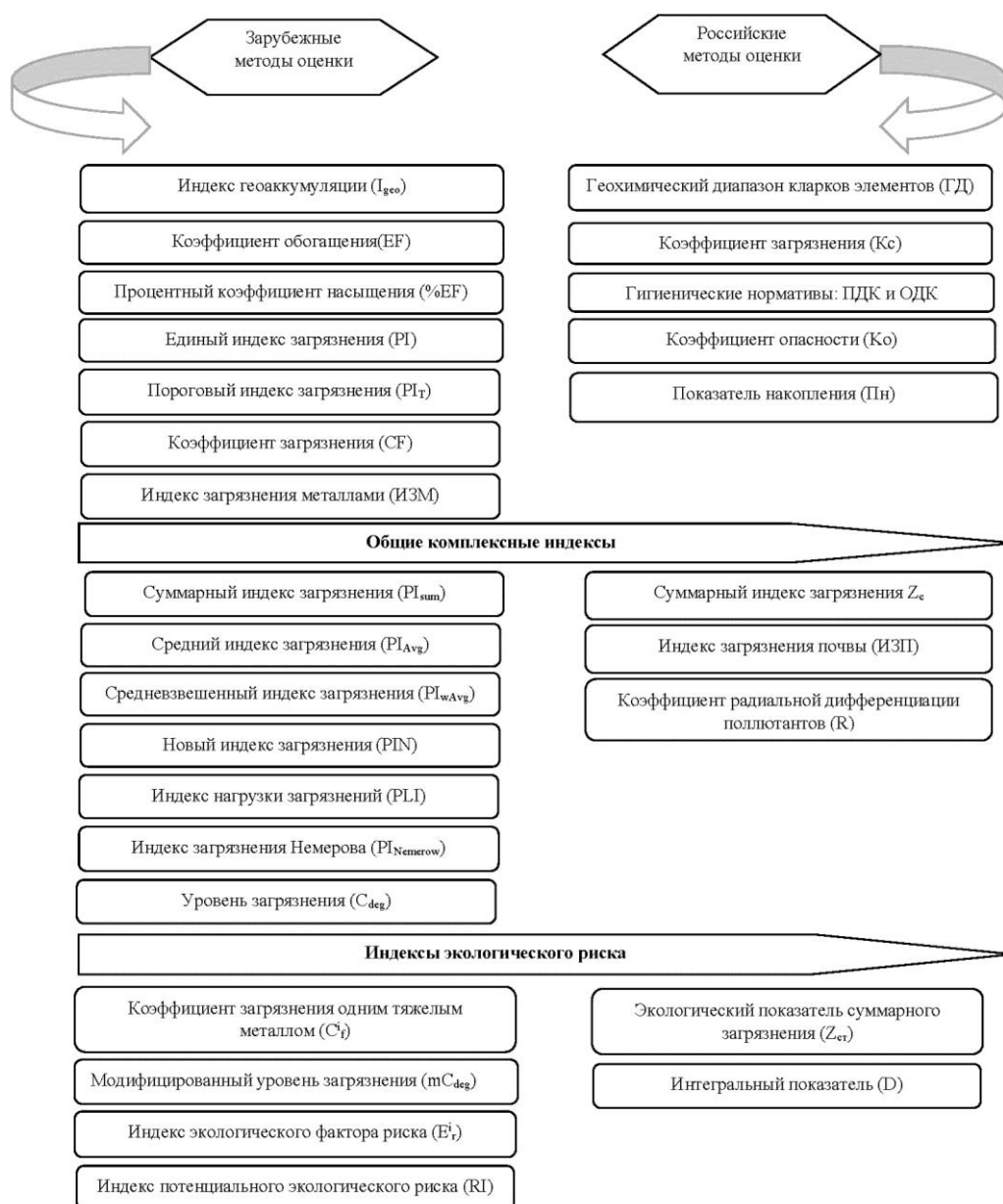


Рис. 2. Зарубежные и российские методы оценки загрязненности почв  
Fig. 2. Foreign and Russian methods for assessing soil contamination

Многоэлементные или комплексные индексы загрязнения используют в случае недостаточной оценки одноэлементными индексами. Наиболее распространенными и широко используемыми являются уровень загрязнения (Cd), индекс загрязнения (PI) и модифицированный индекс загрязнения (MPI) и т. д. Для оценки экологического риска эффективно применяют следующие показатели: индекс потенциального экологического риска (RI), средний коэффициент ERM (MERMQ), индекс степени загрязнения (CSI).

Российскими аналогами зарубежных индивидуальных или одноэлементных индексов являются коэффициент концентрации, кларк концентрации, коэффициент опасности. Данные показатели используют с учетом фоновых значений, кларка или ПДК элемента в почве. При оценке суммарного загрязнения в России чаще всего используют суммарный показатель Саета Zc [48]. Кроме того, имеются различные вариации суммарного показателя: экологический показатель суммарного загрязнения, учитывающий разную токсичность тяжелых элементов – Zст, учитывающий средние геометрические коэффициенты концентрации элементов – Zс(г) и т. д.

Помимо одноэлементных индексов загрязнения используют сравнение содержания элементов с ПДК по установленным гигиеническим нормативам для территории РФ и зарубежных стран.

Существующие российские нормативные требования распространяются на почвы сельскохозяйственных угодий, населенных мест и зон санитарной охраны источников водоснабжения, территорий курортных зон. Для почв территорий промышленных предприятий нормативные критерии оценки отсутствуют.

Канадские нормативы качества почв (Soil Quality Guidelines, SQG), введенные в 1991 г. и периодически обновляемые, сейчас определены для валового содержания химических элементов в почвах для четырех функциональных зон (табл. 2) и направлены на защиту здоровья человека, наземных организмов и почвенных процессов от негативных последствий [14, 15, 36].

В основу немецкого нормирования качества почв положены триггерные и предостерегающие значения,

которые разработаны с учетом риска негативных воздействий для человека при кожных контактах с почвой и др. В случае превышения триггерных значений, дифференцированных для детских площадок, сельскохозяйственных, селитебных, парковых и промышленных территорий, организуется мониторинг сельскохозяйственных угодий с дальнейшей оценкой опасности загрязнения (табл. 2) [14, 15, 37].

Система нормирования качества почв Австралии и Новой Зеландии оформилась в 1992 г., когда была принята инструкция по оценке и управлению загрязненных территорий, основанная на экологических подходах отдельных муниципалитетов двух стран [38]. В Австралии разработаны экосистемно-оценочные уровни для четырех функциональных зон (Ecological Investigation Levels, EIL) на основе фитотоксикологических экспериментов и фоновой почвенной съемки в четырех столицах для урбанизированных территорий и оценочные уровни для здоровья человека (Health Investigation Levels, HIL), зависящие от типа землепользования (табл. 2) [14, 15, 39].

Нормирование содержания химических элементов в почвах ЮАР базируется на канадских подходах. Нормативы (Soil Screening Values) (табл. 2) получены по минимальному уровню среди трех расчетов в системе источник–путь–получатель. В настоящее время существуют нормативы для валового содержания химических элементов в почвах четырех функциональных зон, в том числе для коммерческих и промышленных территорий [14, 15, 40]. Например, стандарты качества почвенной среды в Китае требуют пересмотра в связи с нехваткой научных исследований, связанных с концентрацией тяжелых металлов в почвенном покрове и их экологическими последствиями для здоровья человека [41, 43].

Оценка загрязненности почв исследуемой территории проведена с использованием российских гигиенических нормативов (ПДК и ОДК), а также нормативов, установленных для почв промышленных и коммерческих территорий Германии, Канады, Австралии и ЮАР по стандартным семи элементам.

**Таблица 2.** Нормативы содержания элементов в почвах

**Table 2.** Norms of elements content in soils

Элементы Elements	Содержание, мг/кг Content, mg/kg		Содержание, мг/кг (для промышленных и коммерческих территорий) Content, mg/kg (for industrial and commercial areas)			
	Россия/Russia		Германия [37] Germany [37]	Канада [36] Canada [36]	Австралия [39] Australia [39]	ЮАР [40] South Africa [40]
	ПДК* MPC*	ОДК** APC**				
Мышьяк/Arsenic	2	2–10	140	12	500	150
Кадмий/Cadmium	—***	0,5–2,0	60	22	100	260
Свинец/Lead	32	32–130	2000	600	1500	1900
Никель/Nickel	—	20–80	900	89	3000	10000
Ртуть/Mercury	2,1	—	80	50	75	6,5
Медь/Copper	—	33–132	—	91	5000	19000
Цинк/Zinc	—	55–220	—	410	35000	150000

\*Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве; \*\* Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в песчаных и суглинистых почвах; \*\*\* Прочерк означает, что официальный норматив не разработан.

\*Maximum Permissible Concentrations (MPC) of chemicals in soil; \*\* Approximate Permissible Concentrations (APC) of chemicals in sandy and loamy soils; \*\*\* A dash means that no official standard has been developed.

Оценка суммарного загрязнения произведена по показателям  $Z_c$ ,  $Z_{cm}$  с использованием коэффициента токсичности элемента и  $RI$  (данный показатель у разных авторов можно встретить с другой аббревиатурой, например, PERI) [31, 46, 47].

Суммарный показатель химического загрязнения  $Z_c$  характеризует степень химического загрязнения почв обследуемых территорий вредными веществами различных классов опасности и определяется как сумма коэффициентов концентрации отдельных компонентов:

$$Z_c = K_{c1} + \dots K_{ci} + \dots K_{cn} - (n - 1),$$

где  $n$  – число определяемых компонентов;  $K_{ci}$  – коэффициент концентрации  $i$ -го загрязняющего компонента, равный кратности превышения содержания данного компонента над фоновым значением.

Степень токсичности (и опасности) тяжелых элементов различна. Очевидно, что при одинаковых значениях концентрации суммарное загрязнение будет опаснее, если в почве концентрируются самые токсичные элементы первой группы. Чтобы внести соответствующие поправки на токсичность, следует в формуле при определении суммарного показателя химического загрязнения разным элементам придать разный вес, отвечающий их группе опасности [11].

Экологический показатель суммарного загрязнения ( $Z_{cm}$ ), рассчитывается с учетом степени токсичности элементов, а также коэффициентов концентрации ( $K_{ki}$ ):

$$K_{ki} = C_i / C_{if},$$

где  $C_{if}$  и  $C_i$  – фоновое и фактическое содержание  $i$ -го элемента в почве;

$$Z_{cm} = \sum_{i=1}^n (K_{ki} \times K_{ti} - (n - 1)),$$

где  $K_{ti}$  – коэффициент токсичности  $i$ -го элемента. Для элементов первого класса опасности коэффициент составляет 1,5 (As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn), для элементов второго класса опасности – 1,0 (Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr), для элементов третьего класса опасности – 0,5 (Ba, V, W, Mn, Sr).

Критические значения, позволяющие охарактеризовать суммарное загрязнение по степени опасности, для показателей  $Z_c$  и  $Z_{cm}$  едины: при  $Z_c(Z_{cm}) < 16$  загрязнение считается неопасным; при  $16 < Z_c(Z_{cm}) < 32$  – умеренно опасным; при  $32 < Z_c(Z_{cm}) < 128$  – опасным; при  $Z_c(Z_{cm}) > 128$  – чрезвычайно опасным.

Метод оценки потенциального риска загрязнения тяжелыми металлами ( $RI$ ) разработан шведским ученым Л. Хакансоном. При оценке данным методом учитывается не только содержание тяжелых металлов в почве, но и возможные негативные экотоксикологические последствия загрязнения [44, 45]. В соответствии с этим методом, потенциальный экологический риск рассчитывается с помощью коэффициента  $E_r^i$ :

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i},$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i,$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i,$$

$C_f^i$  является коэффициентом загрязнения (аналог российского коэффициента концентрации  $K_c$ );  $C_s^i$  и  $C_n^i$  – фактическое и фоновое содержание  $i$ -го элемента в почве.

Коэффициент токсичности  $T_r^i$  представлен в табл. 3.

**Таблица 3.** Коэффициент токсичности тяжелых металлов [26, 45]

**Table 3.** Toxicity factor of heavy metals

Элемент/Element	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn	Hg
Значения/Values	10	30	2	5	5	5	1	40

Согласно Хакансону [44], для значений  $E_r^i$  и  $RI$  предложены следующие категории экологического риска:  $E_r^i < 40$  – низкий экологический риск;  $40 < E_r^i \leq 80$  – умеренный экологический риск;  $80 < E_r^i \leq 160$  – значительный экологический риск;  $160 < E_r^i \leq 320$  – высокий экологический риск;  $E_r^i > 320$  – чрезмерно высокий экологический риск;  $RI < 150$  – низкий экологический риск;  $150 < RI < 300$  – умеренный экологический риск;  $300 < RI < 600$  – высокий экологический риск;  $RI \geq 600$  – экстремально высокий экологический риск.

#### Результаты и обсуждение

Результаты экологической оценки почвенного покрова промышленной территории г. Березники на основе отечественных и зарубежных методов представлены в табл. 4–6 и на рис. 2. Водная вытяжка характеризуется разнофазальным составом: гидрокарбонатно-кальциевый и натриевый, сульфатно-кальциевый, нитратно-кальциевый и нитратно-натриевый. Почвы в интервале опробования РУ1–РУ4 представлены супесью с рН<sub>сол</sub> от 5,8 до 7,1; в интервале опробования РУ5–РУ10 – песками с рН<sub>сол</sub> от 6,6 до 8,0.

**Таблица 4.** Содержание валовых форм тяжелых металлов и металлоидов в почвенном покрове промышленной территории г. Березники, мг/кг

**Table 4.** Contents of gross forms of heavy metals and metalloids in the soil cover of the industrial territory of Berezniki, mg/kg

Элемент Element	Содержание, мг/кг (n=10) Content, mg/kg (n=10)			Фоновое содержание, мг/кг (n=4) Background content, mg/kg (n=4)
	Среднее Average	Минимум Minimum	Максимум Maximum	
Ni	18,7	5,7	29,0	5,7
Cu	37,66	11,4	60,3	11,6
As	3,77	1,3	9,2	1,3
Hg	1,91	0,59	4,67	4,67
Cd	0,31	0,08	0,54	0,08
Pb	8,25	6,9	9,6	9,6
Zn	96,84	27,0	140,5	27,0

При оценке микроэлементного состава анализировалось валовое содержание элементов с учетом кислотности среды и литологического состава субстрата. Превышение относительно ПДК (ОДК) выявлено для всех участков опробования по мышьяку (за исключением РУ1), отмечены разовые превышения по ртути, цинку, никелю и меди. Кратность превышений над ПДК (ОДК) по содержанию мышьяка достигает 4,6 раза; по ртути – 2,2; по цинку – 2,5; по никелю – 1,4;

по меди – 1,8 раза. Согласно СанПиН 2.1.7.1283-03 установлена «опасная» категория загрязнения исследуемых почв неорганическими соединениями I и II классов опасности. Почвы на всей территории имеют ограничения по использованию при проведении земляных работ и требуют перекрытия слоем чистого грунта. Такие мероприятия в условиях постоянной геохимической нагрузки на промышленных территориях, которые даже в самой отдаленной перспективе не будут использоваться в сельском хозяйстве, не всегда целесообразны и, как правило, приводят к увеличению объемов загрязненных почв на данных территориях.

Используя для оценки загрязнения системы нормирования качества почв Германии, Канады, Австралии, ЮАР, учитывая функциональное назначение территории (коммерческие и промышленные), получаем иную картину, свидетельствующую об отсутствии превышений ПДК (критических значений). Таким образом, экологическое состояние почв полностью соответствует требованиям, предъявляемым для промышленных и коммерческих территорий. При этом канадские нормативы качества почв, по сравнению с нормативами других стран, являются самыми жесткими. Недостатком нормирования качества почв в Германии является минимальный перечень химических элементов, имеющий триггерный уровень содержания, – шесть элементов. Системы нормирования Австралии и ЮАР отличаются чрезмерно высокими уровнями допустимых значений, используемых для оценки почв. Такие значения содержания элементов характерны для техногенно нарушенных территорий с повышенным экологическим риском.

Канадские нормативы содержания химических элементов в почвах функциональных зон разработаны для более широкого перечня элементов и, с учетом схожих природно-климатических условий, являются наиболее подходящими для территории России.

**Таблица 5.** Уровень загрязнения почвенного покрова относительно нормативных значений

**Table 5.** Pollution level of soil cover in relation to normative values

Statistic	As	Cd	Hg	Pb	Zn	Ni	Cu
Россия/Russia							
Min	0,650	0,160	0,281	0,216	0,491	0,285	0,345
Max	4,600	1,080	2,224	0,300	2,555	1,450	1,827
Median	1,675	0,630	0,750	0,258	1,895	1,010	1,148
Германия/Germany							
Min	0,009	0,001	0,007	0,003	–	0,006	–
Max	0,066	0,009	0,058	0,005	–	0,032	–
Median	0,024	0,005	0,020	0,004	–	0,022	–
Канада/Canada							
Min	0,108	0,004	0,012	0,012	0,066	0,064	0,125
Max	0,767	0,025	0,093	0,016	0,343	0,326	0,663
Median	0,279	0,014	0,032	0,014	0,254	0,227	0,416
Австралия/Australia							
Min	0,003	0,001	0,008	0,005	0,001	0,002	0,002
Max	0,018	0,005	0,062	0,006	0,004	0,010	0,012
Median	0,007	0,003	0,021	0,006	0,003	0,007	0,008
ЮАР/South Africa							
Min	0,009	0,000	0,091	0,004	0,000	0,001	0,001
Max	0,061	0,002	0,718	0,005	0,001	0,003	0,003
Median	0,022	0,001	0,242	0,004	0,001	0,002	0,002

Для оценки химического загрязнения почв использован суммарный показатель химического загрязнения  $Z_c$  как индикатор неблагоприятного воздействия на здоровье населения, характеризующий степень загрязнения почв обследуемых территорий металлами I–III классов опасности и рассчитанный как сумма коэффициентов концентраций отдельных компонентов загрязнения. В качестве фоновых значений для расчета коэффициентов концентраций использованы значения содержания элементов в пробах почв супесчаного состава, отобранных на условно-фоновой территории без антропогенного влияния.

По результатам расчетов значения суммарного показателя  $Z_c$  составили от 7 до 25 (при допустимом уровне 16). К категории загрязнения «допустимая» относятся участки РУ1 и РУ2 в южной части территории исследований, ближайшие к «фоновой» территории. Почвы остальных реперных участков характеризуются «умеренно опасной» категорией загрязнения.

По показателю  $Z_{cm}$  к категории загрязнения «допустимая» относятся участки РУ1 и РУ2, к категории загрязнения «умеренно опасная» – участки РУ3 и РУ4, к категории загрязнения «опасная» – участки РУ5–РУ10. Таким образом, оценка загрязненности по показателю  $Z_{cm}$  позволила более детально охарактеризовать территорию, дифференцировав области загрязнения в зависимости от опасности каждого элемента.

Экологический показатель суммарного загрязнения  $Z_{cm}$ , рассчитанный с учетом поправочного коэффициента на токсичность, отличается от суммарного показателя  $Z_c$  повышенным уровнем загрязнения в 1,7 раза.

Для сравнения результатов отечественных и зарубежных методов оценки загрязненности почв дополнительно к вышеприведенной оценке по показателю  $Z_{cm}$  рассчитан индекс потенциального экологического риска ( $RI$ ). Результаты оценки потенциального экологического фактора риска ( $E_r^i$ ) и индекс потенциального экологического риска ( $RI$ ) представлены в табл. 6.

Порядок потенциального экологического фактора риска ( $E_r^i$ ) тяжелых металлов следующий  $Cd > Hg > Ni > As > Cu > Zn > Pb$ . Значения экологического фактора риска по элементам изменяются от 2 до 324, что свидетельствует о категориях экологического риска от низкого до чрезмерно высокого. К низкой категории экологического риска относятся As, Zn, Cu и Ni. Наибольшая вариация значений наблюдается у Cd и Hg, при этом у элементов категория экологического риска возрастает от умеренного до высокого. Средний коэффициент потенциального экологического риска ( $RI$ ) As, Cd, Hg, Pb, Zn, Ni, Cu составляет 328 и свидетельствует в целом о высоком экологическом риске.

Значения  $RI$  по всем участкам находятся в диапазоне от 138 до 457, что соответствует общему уровню экологического риска от «низкого» до «высокого». Индекс потенциального экологического риска ( $RI$ ) является аналогичным экологическому показателю суммарного загрязнения  $Z_{cm}$ , поскольку при расчете данных показателей учитывается токсичность эле-

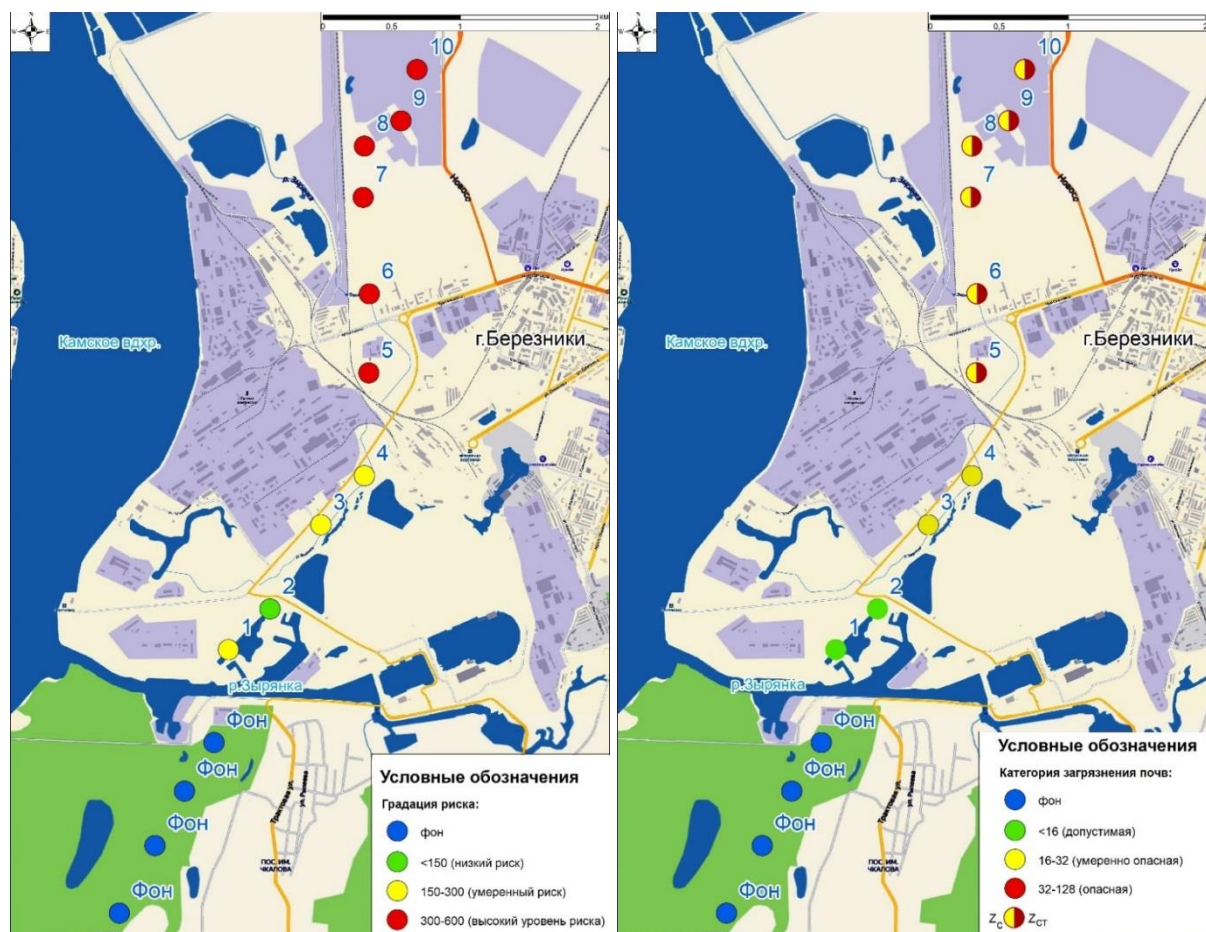
ментов. Выделенные территории по уровню экологического риска ( $RI$ ) в целом соответствуют участкам с установленными категориями загрязнения. Исключе-

ние составляет участок PY1, для которого уровень экологического риска (по показателю  $RI$ ) выше установленной категории загрязнения (по показателю  $Z_{cm}$ ).

**Таблица 6.** Оценка потенциального риска загрязнения тяжелыми металлами почв промышленной территории г. Березники Пермского края

**Table 6.** Assessment of potential risk of heavy metals pollution in soils of the industrial territory of Berezniki, Perm region

ПУ Sampling site	Единый индекс экологического фактора риска ( $E_r^I$ ) Unified Environmental Risk Factor Index ( $E_r^I$ )							$RI$	Градация риска Risk gradation
	As	Cd	Hg	Pb	Zn	Ni	Cu		
PY1	5,20	48,00	205,27	4,60	2,09	6,63	3,05	275	Умеренный/Moderate
PY2	16,00	78,00	25,93	4,46	3,88	7,21	3,00	138	Низкий/Low
PY3	36,80	108,00	43,08	4,31	5,71	24,30	15,87	238	Умеренный/Moderate
PY4	12,00	138,00	60,66	4,17	7,54	17,91	14,50	255	Умеренный/Moderate
PY5	12,40	174,00	77,80	4,03	9,37	20,35	13,13	311	Высокий/High
PY6	12,80	204,00	95,38	3,88	10,87	22,67	11,76	361	Высокий/High
PY7	13,20	234,00	112,97	3,74	10,06	25,12	10,39	409	Высокий/High
PY8	13,60	264,00	130,11	3,60	9,26	27,44	9,03	457	Высокий/High
PY9	14,00	294,00	40,00	3,45	8,46	32,09	9,55	402	Высокий/High
PY10	14,80	324,00	49,67	3,31	7,66	33,72	8,82	442	Высокий/High
Среднее/Average	15,08	186,60	84,09	3,95	7,49	21,74	9,91	328,87	Высокий/High



**Рис. 3.** Пространственное распределение (А) индекса потенциального экологического риска и (Б) суммарных показателей загрязнения на территории промышленной зоны Березниковского городского округа, Пермского края  
**Fig. 3.** Spatial distribution (A) of potential ecological risk and (B) total pollution indices in the industrial zone of Berezniki urban district, Perm region

### Заключение

Современная российская система нормирования в области оценки загрязненности почв объединяет две концепции: геохимическую и экологическую [11].

При геохимическом подходе критерием загрязнения является соотношение содержания элемента в загрязненной почве к его содержанию в «фоновой» почве. Наиболее часто используемым показателем при геохимическом методе оценки является суммар-

ный показатель химического загрязнения, при расчете которого не учитывается различие в токсичности (и опасности) элементов. При одинаковых значениях концентрации суммарное загрязнение будет опаснее, если в почве концентрируются самые токсичные элементы первой группы. Соответствующие поправки на токсичность элементов учитываются в экологическом показателе суммарного загрязнения [12]. Аналогичный метод оценки применяют в зарубежных странах, определяя уровень экологического риска территории. Приведенные в статье результаты оценки территории по уровню потенциального экологического риска в целом соответствуют выделенным участкам с различными категориями загрязнения по суммарному показателю загрязнения с учетом использования коэффициента токсичности.

При экологическом подходе валовое содержание элементов в почве оценивается относительно его предельно допустимой концентрации или ориентировочно допустимой концентрации. Принятые фиксированные величины предельно и ориентировочно допустимых концентраций не учитывают различия в функциональном назначении территорий в России. В отличие от

России, в зарубежных странах достаточно широко применяются дифференцированные пороговые значения. Соответственно, результаты проведенной в статье оценки загрязненности почв промышленной территории относительно российских и зарубежных допустимых значений значительно отличаются.

Множество способов оценки экологического состояния почв, предлагаемое, в том числе, и отечественными авторами, свидетельствует о несовершенстве регламентированных нормативно-технической документацией методов. В связи с чем наиболее целесообразным представляется актуализация нормативных требований Российской Федерации с учетом отечественного и зарубежного опыта оценки загрязненности почв. Для оценки почв промышленных территорий в России можно рекомендовать нормативы содержания химических элементов в почвах промышленных и коммерческих территорий, разработанные в Канаде.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50071 и Министерства науки и высшего образования проект № 2019-0858.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касимов Н.С., Власов Д.В. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2018. – № 3. – С. 14–22.
2. Власов Д.В., Касимов Н.С. Геохимические аномалии металлов и металлоидов в компонентах ландшафтов в восточной части Москвы: парагенезисы элементов и типология // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2016. – № 3. – С. 50–57.
3. Ворончихина Е.А., Ушакова Е.С. Геохимия ландшафтов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2012. – 139 с.
4. Корляков И.Д., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Тяжелые металлы и металлоиды в почвенном покрове г. Улан-Удэ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 3. – С. 120–137. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.03.09
5. Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic / H. Doležalová Weissmannová, S. Mihočová, P. Chovanec, J. Pavlovský // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2019. – 16 (22), 4495. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph16224495> (дата обращения 01.09.2020).
6. Yaylalı-Abanuz G. Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey // Microchemical Journal. – 2011. – V. 99. – P. 82–92. DOI: 10.1016/j.microc.2011.04.004
7. Горлушкина К.С., Бадмаева С.Э. Содержание тяжелых металлов в почвах промышленных предприятий г. Красноярска // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 6. – С. 254–258.
8. Радомская В.И., Бородин Н.А. Оценка антропогенного загрязнения почвы урбанизированной территории на примере города Благовещенска // Геоэкология. Инженерная геология, Гидрогеология, Геокирология. – 2019. – № 6. – С. 79–93. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019679-93>
9. Шишкина Д.Ю. Тяжелые металлы в почвах Ростова-на-Дону. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2017. – 98 с.
10. Дабахов М.В. Экологическая оценка техногенно загрязненных почв урбанизированных территорий и промышленных зон г. Нижнего Новгорода: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – М., 2012. – 46 с.
11. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. – М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. – 165 с.
12. Водяницкий Ю.Н. Оценка суммарной токсикологической загрязненности почв тяжелыми металлами и металлоидами // Агрохимия. – 2017. – № 2. – С. 56–63.
13. Обзор подходов к оценке экологического состояния и нормированию качества почв / А.Г. Коновалов, Д.В. Рисник, А.П. Левич, П.В. Фурсова // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». – 2017. – Т. 9. – № 3. – С. 214–229. DOI: 10.24855/BIOSFERA.V9I3.371
14. Семенов И., Королева Т. Мировой опыт нормирования содержания химических элементов в почве // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 62–67. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-2-62-67> (дата обращения 01.09.2020).
15. Семенов И.Н., Королева Т.В. Международные системы нормирования содержания химических элементов в почвах: принципы и методы (обзор) // Почвоведение. – 2019. – № 10. – С. 1259–1268. DOI: 10.1134/S0032180X19100101
16. Нормативы содержания химических элементов в почве: международный опыт и использование для Западной Сибири / И.Н. Семенов, Т.В. Королева, А.В. Шарапова, Е.В. Терская // География и природные ресурсы. – 2020. – № 1. – С. 41–49. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-1(41-49)
17. Меньшикова Е.А., Караваева Т.И. Особенности оценки состояния грунтов в практике инженерно-экологических изысканий // Инженерные изыскания. – 2019. – № 4. – С. 16–23. URL: <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-4-16-23> (дата обращения 01.09.2020).
18. Никитина А.В., Жаткина Т.С., Курбатова А.И. Некоторые аспекты нормирования загрязняющих веществ в почве // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 5. – С. 84–89.
19. Подлипский И.И. Эколого-геологическая оценка парагенетических геохимических ассоциаций функциональных зон Санкт-Петербурга // Инженерные изыскания. – 2013. – № 12. – С. 53–59.
20. Трофимов В.Т., Харькина М.А. Еще раз о содержании инженерно-экологических изысканий — достижения, упущенные возможности и недостатки в СП 47.13330.2012 // Инженерные изыскания. – 2015. – № 7. – С. 16–22.
21. Хаустов А.П., Редина М.М. Углеродное загрязнение почв и грунтов: практика нормирования, проблемы и тенденции // Геоэкология. – 2017. – № 1. – С. 3–14.
22. Torcuoglu B. Assessment of heavy metal pollution in greenhouse soils // Proceedings of the International Conference on Chemical,



- Environment and Biological Sciences. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. – P. 164–168.
23. Chiroma T.M., Ebeewe R.O., Hymore F.K. Comparative assessment of heavy metal levels in soil, vegetables and urban grey waste water used for irrigation in Yola and Kano // International Refereed Journal of Engineering and Science. – 2014. – V. 3. – Iss. 2. – P. 1–9.
24. Состояние и охрана окружающей среды муниципального образования «Город Березники» в 2018 г. – Пермь: Изд-во Миг, 2019. – 59 с.
25. Еремченко О.З. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. – Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2016. – 252 с.
26. Guan Y., Shao C., Ju M. Heavy metal contamination assessment and partition for industrial and mining gathering areas // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2014. – № 11. – P. 7286–7303.
27. Kamunda C., Mathuthu M., Madhuku M. Health risk assessment of heavy metals in soils from Witwatersrand gold mining basin, South Africa // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2016. – № 13:663. DOI: 10.3390/ijerph13070663
28. Speciation, sources, and risk assessment of heavy metals in suburban vegetable garden soil in Xianyang City, Northwest China / L. Wang, W. Tao, R.C. Smardon et al. // Frontiers of Earth Science. – 2018. – № 12. – P. 397–407. URL: <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0658-8> (дата обращения: 01.09.2020).
29. Assessment of heavy metal contamination levels of street dust in the city of Lublin, Poland / W. Zglobicki, M. Telecka, S. Skupiński et al. // Environmental Earth Science. – 2018. – 77:774. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7969-2> (дата обращения: 01.09.2020).
30. Zglobicki W., Telecka M., Skupiński S. Assessment of short-term changes in street dust pollution with heavy metals in Lublin (E Poland) – levels, sources and risks // Environmental Science Pollution Research. – 2019. – Res. 26. – P. 35049–35060. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06496-x> (дата обращения: 01.09.2020).
31. Weissmannová H.D., Pavlovský J. Indices of soil contamination by heavy metals – methodology of calculation for pollution assessment (minireview) // Environmental Monitoring and Assessment. – 2017. – 189:616. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6340-5> (дата обращения: 01.09.2020).
32. Heavy metal contamination and ecological risk assessment in soils and sediments of an industrial area in Southwestern Nigeria / T.O. Kolawole, A.S. Olatunji, M.T. Jimoh, O.T. Fajemila // Journal of Health and Pollution. – 2018. – V. 8. – № 19:180906. URL: <https://doi.org/10.5696/2156-9614-8.19.180906> (дата обращения: 01.09.2020).
33. Comparison of heavy metals contamination and ecological risk between soils enriched with compost and chemical fertilizers in the North of Iran and ecological risk assessment / A. Amouei, H. Fallah, H. Asgharnia, M. Mousapour, H. Parsian, M. Hajiahmadi et al. // Environmental Health Engineering and Management Journal. – 2020. – № 7 (1). – P. 7–14 URL: <http://ehemj.com/article-1-565-en.html> (дата обращения: 01.09.2020).
34. Contamination and health risk assessment of heavy metals in the soil of major cities in mongolia / S. Chonokhuu, C. Batbold, B. Chuluunpurev, E. Battengel, B. Dorjsuren, B. Byambaa // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2019. – 16:2552. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31319540/> (дата обращения 01.09.2020).
35. Spatial distribution of heavy metals and the environmental quality of soil in the Northern Plateau of Spain by geostatistical methods / F. Santos-Francés, A. Martínez-Graña, C.Á. Zarza, A.G. Sánchez, P.A. Rojo // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2017. – 14:568. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph14060568> (дата обращения 01.09.2020).
36. CCME. Canadian Council for Ministers for the Environment. 2018. Canadian Environmental Quality Guidelines. URL: <http://sts.ccme.ca/en/index.html> (дата обращения 01.09.2020).
37. BBodSchV. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999. Bundesgesetzblatt I, 1554. 33 p. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/bodschv/BBodSchV.pdf> (дата обращения 02.09.2020).
38. Australian and New Zealand Guidelines for the Assessment and Management of Contaminated Sites. 1992. URL: [https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/Assessment\\_and\\_management\\_of\\_contaminated\\_sites.pdf](https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/Assessment_and_management_of_contaminated_sites.pdf) (дата обращения 01.09.2020).
39. Department of Environment and Conservation. Assessment levels for Soil, Sediment and Water. 2010. 56 p. URL: [https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/2009641\\_-\\_assessment\\_levels\\_for\\_soil\\_sediment\\_and\\_water\\_-\\_web.pdf](https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/2009641_-_assessment_levels_for_soil_sediment_and_water_-_web.pdf) (дата обращения 01.09.2020).
40. Government notice. National norms and standards for the remediation of contaminated land and soil quality. Department of Environmental affairs. National Environmental management: Waste Act. Act no. 59 of 2008 // Government Gazette Staatskoerant. – 2014. – V. 587. – № 37603. – 8 p.
41. Inengite A.K., Abasi C.Y., Walter C. Application of pollution indices for the assessment of heavy metal pollution in flood impacted soil // International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. – 2015. – V. 8 (3). – P. 175–189. URL: <https://doi.org/10.9734/IRJPAC/2015/17859> (дата обращения: 01.09.2020).
42. Muller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River // GeoJournal. – 1969. – № 2. – P. 108–118.
43. Overview on current criteria for heavy metals and its hint for the revision of soil environmental quality standards in China / Chen Shi-bao, Wang Meng, Li Shan-shan, Zhao Zhong-qiu, E Wen-di // Journal of Integrative Agriculture. – 2018. – № 17 (4). – P. 765–774. DOI: 10.1016/S2095-3119(17)61892-6
44. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // Water Research. – 1980. – № 14 (8). – P. 975–1001. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8) (дата обращения: 01.09.2020).
45. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index / Z. Xu, S. Ni, X. Tuo, C. Zhang // Environmental Science and Technology. – 2008. – № 31. – P. 112–115.
46. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – a review / J.B. Kowalska, R. Mazurek, M. Gasiorek et al. // Environmental Geochemistry and Health. – 2018. – № 40. – P. 2395–2420. URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z> (дата обращения: 01.09.2020).
47. Soil pollution indices conditioned by medieval metallurgical activity – a case study from Krakow (Poland) / J. Kowalska, R. Mazurek, M. Gasiorek, M. Setlak, T. Zaleski, J. Waroszewski // Environmental Pollution. – 2016. – № 218. – P. 1023–1036. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.053> (дата обращения: 01.09.2020).
48. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Изд-во Недр, 1990. – 335 с.

Поступила 08.09.2020 г.

#### Информация об авторах

**Ушакова Е.С.**, младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Караваева Т.И.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Белкин П.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

UDC 504.054

## ECOLOGICAL CONDITION OF SOILS IN INDUSTRIAL AREAS (AS IN THE CASE OF BEREZNIKI, PERM REGION): COMPARISON OF RUSSIAN AND FOREIGN METHODS OF ASSESSMENT

Evgenia S. Ushakova<sup>1</sup>,  
ushakova.evgeniya@gmail.com

Tatiana I. Karavaeva<sup>1</sup>,  
jewel\_@list.ru

Pavel A. Belkin<sup>1</sup>,  
pashabelkin@mail.ru

<sup>1</sup> Perm State National Research University,  
4, Genkel street, Perm, 614990, Russia.

**The relevance.** Intensive anthropogenic impact on the environment, specifically within industrial areas, contributes to soil degradation and accumulation of technophilic chemical elements in the soil cover. The increasing contamination of urban soils with heavy metals due to intense industrial load is a serious environmental problem. Despite the increased interest in ecological condition of soils in industrial areas, the current standardization system in the Russian Federation is not sufficiently developed and precludes an accurate specification of contamination.

**The main aim** of the research is to determine the level of soil contamination with heavy metals within the industrial area of an urban territory, compare Russian and foreign methods for soil contamination assessment and justification of the need for updating reference documentation.

**Methods.** The content of heavy metals in soils was determined by the mass spectrometry method on the basis of the nanomineralogy Sector of the center for Collective Use of Perm State National Research University.

**Results and conclusions.** Russian and foreign methods for assessing ecological condition of soils are considered. The level of soil contamination by heavy metals and metalloids within the industrial areas of large chemical enterprises of Perm region was estimated using Russian and foreign soil quality standards, total pollution indices and potential ecological risk. The relevance of functional purpose of territories when assessing pollution using individual indices is shown. Similar results were obtained for assessing the degree of soil pollution when using Russian total indices, not regulated by reference documentation, and foreign total indices. It is deduced that it is necessary to update the regulatory requirements of the Russian Federation, taking into account Russian and foreign experience in assessing soil contamination.

### Key words:

Soil quality guidelines, heavy metals, soil contamination level, industrial areas, total pollution indices, potential ecological risk.

The research was financially supported by the RFBR within the science project no. 19-05-50071 and the Ministry of Science and Higher Education, project no. 2019-0858.

### REFERENCES

- Kasimov N.S., Vlasov D.V. Heavy metals and metalloids in urban soils of Russian cities (according to the annual reports of Rosgidromet). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2018, no. 3, pp. 14–22. In Rus.
- Vlasov D.V., Kasimov N.S. Geochemical anomalies of metals and metalloids in landscape components of the eastern part of Moscow: parageneses of chemical elements and typology. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2016, no. 3, pp. 50–57. In Rus.
- Voronchikhina E.A., Ushakova E.S. *Geokhimiya landshaftov* [Geochemistry of landscapes]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2012. 139 p.
- Korlyakov I., Kasimov N., Kosheleva N. Heavy metals and metalloids in the soil cover of the city of Ulan-Ude. *PNRPU. Applied Ecology. Urban Development*, 2019, no. 3, pp. 120–137. In Rus. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.03.09.
- Doležalová Weissmannová H., Mihočová S., Chovanec P., Pavlovský J. Potential Ecological Risk and Human Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Industrial Affected Soils by Coal Mining and Metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16, 4495. DOI: 10.3390/ijerph16224495
- Yaylalı-Abanuz G. Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey. *Microchemical Journal*, 2011, vol. 99, pp. 82–92. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.04.004> (accessed: 1 September 2020).
- Gorlushkin K.S., Badmaeva S.E. Content of heavy metals in soils of industrial enterprises in Krasnoyarsk. *Vestnik KrasGAU*, 2018, no. 6, pp. 254–258. In Rus.
- Radomskaya V.I., Borodina N.A. Assessment of anthropogenic contamination in an urban territory by the example of Blagoveshchensk city. *Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geokryology*, 2019, no. 6, pp. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019679-93 In Rus.
- Shishkina D.Yu. *Tyazhelye metally v pochvakh Rostova-na-Donu* [Heavy metals in soils of Rostov-on-Don]. Taganrog, Southern Federal University Publ. house, 2017. 98 p.
- Dabakhov M.V. *Ekologicheskaya otsenka tekhnogenno zagryaznennykh pochv urbanizirovannykh territoriy i promyshlennykh zon g. Nizhnego Novgoroda*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecological assessment of the technogenic polluted soils of the urbanized territories and industrial zones of Nizhny Novgorod. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2012. 46 p.
- Vodianitsky Yu.N. *Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh* [Heavy metals and metalloids in soils]. Moscow, GNU Soil Institute named after V.V. Dokuchayeva RAASHN, 2008. 165 p.
- Vodianitskiy Yu.N. Assessment of the total toxicological pollution of the soil with heavy metals and metalloids. *Agrochemistry*, 2017, no. 2, pp. 56–63. In Rus.
- Konovalov A.G., Risnik D.V., Levich A.P., Fursova P.V. Overview of approaches to the ecological state estimation and soil quality regulation. *Interdisciplinary scientific and applied journal «Biosphere»*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 214–229. In Rus. DOI: 10.24855/BIOSFERA.V9I3.371.



14. Semenov I.N., Korolyeva T.V. World experience in rationing the content of chemical elements in the soil. *Ecology and Industry of Russia*, 2019; vol. 23, no. 2, pp. 62–67. In Rus. Available at: doi.org/10.18412/1816-0395-2019-2-62-67 (accessed: 1 September 2020).
15. Semenov I.N., Korolev T.V. International systems of the chemical elements content rationing in soils: principles and methods (review). *Soil science*, 2019, no. 10, pp. 1259–1268. In Rus. DOI: 10.1134/S0032180X1910010116.
16. Semenov I.N., Korolev T.V., Sharapova A.V., Terskaya E.V. Standards for the content of chemical elements in soil: international experience and use for Western Siberia. *Geography and natural resources*, 2020, no. 1, pp. 41–49. In Rus. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-1(41-49).
17. Menshikova E.A., Karavaeva T.I. Estimation features of soil conditions in practice of engineering and ecological surveys. *Engineering Surveys*, 2019, vol. XIII, no. 4, pp. 16–23. In Rus. Available at: https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-4-16-23.18 (accessed: 1 September 2020).
18. Nikitina A.V., Zhatkina T.S., Kurbatova A.I. Some aspects of pollutants rationing in soil. *PFUR Newsletter, Ecology and life safety series*, 2013, no. 5, pp. 84–89. In Rus.
19. Podlipsky I.I. Ecological and geological assessment of paragenetic geochemical associations of functional zones of Saint-Petersburg. *Engineering Investigations*, 2013, no. 12, pp. 53–59. In Rus.
20. Trofimov V.T., Kharkina M.A. Once again about the content of engineering and ecological surveys - achievements, missed opportunities and shortcomings in SP 47.13330.2012. *Engineering surveys*, 2015, no. 7, pp. 16–22. In Rus.
21. Khaustov A.P., Redina M.M. Hydrocarbon pollution of soils and grounds: practice of normalization, problems and tendencies. *Geoeology*, 2017, no. 1, pp. 3–14. In Rus.
22. Topcuoğlu B. Assessment of heavy metal pollution in greenhouse soils. *Proceedings of the International Conference on Chemical, Environment and Biological Sciences (CEBS-2014)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, pp. 164–168.
23. Chiroma T.M., Ebewe L.O., Hymore F.K. Comparative assessment of heavy metal levels in soil, vegetables and urban grey waste water used for irrigation in Yola and Kano. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 2014, vol. 3, Iss. 2, pp. 1–9.
24. *Sostoyaniye i okhrana okruzhayushchey sredy munitipalnogo obrazovaniya «Gorod Berezniki» v 2018 g.* [Report of State and Environmental protection of the Municipality «City of Berezniki» 2018 year]. Perm, Mig Publ., 2019. 59 p.
25. Eremchenko O.Z. *Pochvy i tekhnogennyye poverkhnostnyye obrazovaniya urbanizirovannykh territoriy Permskogo Prikamya* [Soils and technogenic formations of urbanized territories of the Perm region]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2016. 252 p.
26. Guan Y., Shao C., Ju M. Heavy metal contamination assessment and partition for industrial and mining gathering areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, vol. 11, pp. 7286–7303. Available at: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4113876/ (accessed 1 September 2020).
27. Kamunda C., Mathuthu M., Madhuku M. Health risk assessment of heavy metals in soils from Witwatersrand Gold Mining Basin, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, no. 13:663. Available at: https://doi.org/10.3390/ijerph13070663 (accessed 1 September 2020).
28. Wang L., Tao W., Smardon R.C. Speciation, sources, and risk assessment of heavy metals in suburban vegetable garden soil in Xianyang City, Northwest China. *Frontiers of Earth Science*, 2018, vol. 12, pp. 397–407. Available at: https://doi.org/10.1007/s11707-017-0658-8 (accessed 1 September 2020).
29. Zglobicki W., Telecka M., Skupiński S. Assessment of heavy metal contamination levels of street dust in the city of Lublin, Poland. *Environmental Earth Science*, 2018, 77:774. Available at: https://doi.org/10.1007/s12665-018-7969-2 (accessed 1 September 2020).
30. Zglobicki W., Telecka M., Skupiński S. Assessment of short-term changes in street dust pollution with heavy metals in Lublin (E Poland) – levels, sources and risks. *Environmental Science Pollution Research*, 2019, Res. 26, pp. 35049–35060. Available at: https://doi.org/10.1007/s11356-019-06496-x (accessed 1 September 2020).
31. Weissmannová H.D., Pavlovský J. Indices of soil contamination by heavy metals – methodology of calculation for pollution assessment (minireview). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189:616. Available at: https://doi.org/10.1007/s10661-017-6340-5 (accessed 1 September 2020).
32. Kolawole T.O., Olatunji A.S., Jimoh M.T., Fajemila O.T. Heavy metal contamination and ecological risk assessment in soils and sediments of an industrial area in Southwestern Nigeria. *Journal of Health and Pollution*, 2018, vol. 8, no. 19:180906. Available at: https://doi.org/10.5696/2156-9614-8.19.180906 (accessed 1 September 2020).
33. Amouei A., Fallah H., Asgharnia H., Mousapour A., Parsian H., Hajiahmadi M. Comparison of heavy metals contamination and ecological risk between soils enriched with compost and chemical fertilizers in the North of Iran and ecological risk assessment. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 2020, no. 7 (1), pp. 7–14. Available at: http://ehemj.com/article-1-565-en.html (accessed 1 September 2020).
34. Chonokhuu S., Batbold C., Chuluunpurev B., Battsengel E., Dorjuren B., Byambaa B. Contamination and health risk assessment of heavy metals in the soil of major cities in Mongolia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16:2552. Available at: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31319540/ (accessed 1 September 2020).
35. Santos-Francés F., Martínez-Graña A., Zarza C.Á., Sánchez A.G., Rojo P.A. Spatial distribution of heavy metals and the environmental quality of soil in the Northern Plateau of Spain by geostatistical methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14:568. Available at: https://doi.org/10.3390/ijerph14060568 (accessed 1 September 2020).
36. CCME. Canadian Council for Ministers for the Environment. 2018. *Canadian Environmental Quality Guidelines*. Available at: http://st-ts.ccme.ca/en/index.html (accessed 1 September 2020).
37. BBodSchV. *Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999*. Bundesgesetzblatt I, 1554. 33 p. Available at: https://www.gesetze-im-internet.de/bodschv/BBodSchV.pdf (accessed 2 September 2020).
38. *Australian and New Zealand Guidelines for the Assessment and Management of Contaminated Sites*. 1992. Available at: https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/Assessment\_and\_management\_of\_contaminated\_sites.pdf (accessed 1 September 2020).
39. *Department of Environment and Conservation. Assessment levels for Soil, Sediment and Water*. 2010. 56 p. Available at: https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/2009641\_-\_assessment\_levels\_for\_soil\_sediment\_and\_water\_-\_web.pdf (accessed 1 September 2020).
40. Government notice. National norms and standards for the remediation of contaminated land and soil quality. Department of Environmental affairs. National Environmental management: Waste Act. Act no. 59 of 2008. *Government Gazette Staatskoerant*, 2014, vol. 587, no. 37603, 8 p. Available at: https://cer.org.za/wp-content/uploads/2010/03/national-environmental-management-waste-act-59-2008-national-norms-and-standards-for-the-remediation-of-contaminated-land-and-soil-quality\_20140502-GGN-37603-00331.pdf (accessed 1 September 2020).
41. Inengite A.K., Abasi C.Y., Walter C. Application of pollution indices for the assessment of heavy metal pollution in flood impacted soil. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 2015, vol. 8 (3), pp. 175–189. Available at: https://doi.org/10.9734/IRJPAC/2015/17859 (accessed 1 September 2020).
42. Muller G. Index of Geo-Accumulation in Sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 1969, vol. 2, pp.108–118.
43. Chen Shi-bao, Wang Meng, Li Shan-shan, Zhao Zhong-qiu, E Wen-di. Overview on current criteria for heavy metals and its hint for the revision of soil environmental quality standards in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, vol. 17 (4), pp. 765–774. DOI: 10.1016/S2095-3119(17)61892-6 Available at: http://www.chinaagrisci.com/Jwk\_zgnykx/en/10.1016/S2095-3119(17)61892-6 (accessed 1 September 2020).

44. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14 (8), pp. 975–1001. Available at: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8) (accessed 1 September 2020).
45. Xu Z., Ni S., Tuo X., Zhang C. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science and Technology*, 2008, no. 31, pp. 112–115. Available at: [https://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-FJKS200802029.htm](https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-FJKS200802029.htm) (accessed 1 September 2020).
46. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – a review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, 40:2395–2420. Available at: [https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z\(0](https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z(0) (accessed 1 September 2020).
47. Kowalska J., Mazurek R., Gasiorek M., Setlak M., Zaleski T., Waroszewski J. Soil pollution indices conditioned by medieval metallurgical activity – a case study from Krakow (Poland). *Environmental Pollution*, 2016, no. 218, pp. 1023–1036. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.053.123> (accessed 1 September 2020).
48. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.

Received: 8 September 2020.

#### Information about the authors

**Evgenia S. Ushakova**, junior researcher, Perm State National Research University.

**Tatiana I. Karavaeva**, Cand. Sc., senior researcher, Perm State National Research University.

**Pavel A. Belkin**, Cand. Sc., researcher, Perm State National Research University.

УДК 622.83

## ОБОСНОВАНИЕ РЕГЛАМЕНТА ПРОХОДКИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЗАИМОВЛИЯЮЩИХ ВЫРАБОТОК В НАПРЯЖЕННЫХ ТРЕЩИНОВАТЫХ СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ

Харисов Тимур Фаритович<sup>1</sup>,  
timur-ne@mail.ru

Балец Александр Евгеньевич<sup>1</sup>,  
balek@igduran.ru

Озорнин Иван Леонидович<sup>1</sup>,  
ivan.ozornin@igduran.ru

<sup>1</sup> Институт горного дела УрО РАН,  
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью учета взаимного влияния выработок, сооружаемых в напряженных трещиноватых массивах скальных пород, с целью сохранения устойчивости сближенных выработок в процессе их строительства и эксплуатации.

**Целью** исследования является оценка размеров зоны деформирования, образующейся вокруг одиночной горизонтальной выработки в процессе ее строительства, с последующим обоснованием типов и параметров крепи, обеспечивающей их устойчивость.

На основании результатов экспериментально-аналитических исследований процессов деформирования системы «крепь–массив», которые были получены и накоплены на протяжении 50 лет в процессе строительства выработок в массиве хромитовых месторождений Донского ГОКа, выполнена оценка напряженно-деформированного состояния породного массива в масштабах шахтного поля и обоснована геомеханическая модель массива, находящегося в условиях запредельного деформирования, характеризующаяся постепенным хрупким разрушением пород и последующими взаимными перемещениями структурных блоков на глубинах свыше 500–600 м.

**Результаты.** Расчетным методом определены радиусы зон деформирования массива, формирующихся в различных условиях вокруг капитальных выработок для всего диапазона проектных глубин исследуемого месторождения. Выявлен интервал оптимальных значений отпора и несущей способности крепи, обеспечивающих уменьшение радиусов зон деформирования вокруг горизонтальных протяженных и большеобъемных выработок дробильно-перелусковых комплексов. Разработан технологический регламент проходки и крепления такого типа выработок, в котором учтены процессы запредельного деформирования породного массива, происходящие вокруг каждой из выработок. Выполнено обоснование типов (специальный профиль СВГ 17÷27) и параметров крепления параллельных взаимовлияющих выработок в условиях исследуемого массива, обеспечивающих требуемый отпор и устойчивость сближенных выработок, как в процессе проходки, так и при последующей эксплуатации. Апробация и практическая реализация полученных технологических решений в настоящее время осуществляется в процессе строительства околоствольных дворов новой очереди шахты ДНК Донского горно-обогатительного комбината.

### Ключевые слова:

Массив горных пород, натурные исследования, напряженно-деформированное состояние, структурное строение, иерархическая блочность.

### Введение

Строительство сближенных параллельных выработок околоствольных дворов шахт нередко сопровождается нарушениями крепи, вызванными взаимным влиянием зон деформирования приконтурного массива, формирующихся вокруг выработок в процессе их проходки. В устойчивых массивах I, II и III категорий, представленных прочными слаботрещинистыми породами, данные зоны развиваются в соответствии с закономерностями деформирования упругой однородной среды. При этом радиус зоны влияния каждой выработки распространяется на 1–1,5 ее ширины [1–9]. Исследования влияния зоны деформирования одиночной выработки на соседние в условиях угольного массива показали, что она составляет около 2,0–2,5 ее ширины [10].

Однако деформации и нарушения крепи, произошедшие при строительстве горизонтальных и вертикальных выработок шахты «Десятилетие независимости Казахстана» (ДНК) Донского горно-обогатительного комбината (Дон ГОК, г. Хромтау, Казахстан) показа-

ли отсутствие корреляции установленных ранее закономерностей с процессами деформирования, протекающими в скальном сильнотрещинистом массиве IV–V категории устойчивости.

Повышенные размеры зоны деформирования вокруг одиночной выработки неоднократно фиксировались при проведении инструментальных наблюдений в процессе проходки. Прослеживался рост смещений деформационных реперов, установленных в приконтурных скважинах грузовой ветви гор. –215 м (глубина 660 м) скипового ствола шахты «Молодежная», при удалении забоя на расстояние до 80 м; на контуре бетонной крепи ствола «Вспомогательный» на глубине свыше 500 м при удалении забоя до 8 м; на контуре штрека всячего бока гор. –135 м (глубина 580 м) шахты «Молодежная» при удалении забоя на расстояние до 5 м; на контуре породной стенки ствола «Клетевой» на глубинах 818–838 м при удалении забоя на расстояние до 20 м; на контуре спинок чугунных тубингов ствола «Клетевой» на глубинах 886–954 м при удалении забоя на расстояние до 69 м [11].

### Объект и методы исследования

С целью оценки размеров зоны деформирования, образующейся вокруг одиночной горизонтальной выработки в процессе ее строительства с последующим обоснованием типов и параметров крепи, обеспечивающей устойчивость сближенных выработок новой очереди, выполнено исследование напряженно-деформированного состояния массива хромитовых месторождений, основная часть которых в настоящее время разрабатывается шахтой ДНК на глубинах свыше 500–600 м.

Исследуемый массив сложен в основном серпентинизированными дунитами со следующими физико-механическими свойствами в образцах: предел прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} = -45 \dots -90$  МПа, на одноосное растяжение  $\sigma_{раст} = 5 \dots 9$  МПа, статический модуль упругости  $E = 35 \dots 40$  ГПа, статический коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25 \dots 0,30$ . Разбитость многочисленными хаотичными трещинами и разноориентированными тектоническими нарушениями на разномасштабные структурные блоки, связи между которыми изначально довольно слабы, а при увлажнении, когда тальковидный милонитовый или серпофитовый заполнитель трещин становится мыльным на ощупь, падают практически до нуля, обуславливают чрезвычайно низкую (IV–V категория) устойчивость приконтурного массива выработок околоствольных дворов шахты.

Выявленное по результатам натурных исследований [12, 13] напряженно-деформированное состояние (НДС) породного массива в масштабах шахтного поля подразделяется на два основных участка, которые совпадают с очередностями отработки шахты. Вертикальные напряжения на обоих участках изменяются в соответствии с приращением  $\gamma H$ , а главные горизонтальные напряжения  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  определяются следующими эмпирическими зависимостями:

- на участке 1-й очереди:  $\sigma_{\max} = \lambda \gamma H + 14$  МПа,  $\sigma_{\min} = \lambda \gamma H + (7 \dots 10)$  МПа, при азимуте оси  $\sigma_{\max} - 50 \dots 60^\circ$ ;
- на участке 2-й очереди:  $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \gamma H$ , где  $\gamma = 0,026$  МН/м<sup>3</sup> – объемный вес породного массива;  $H$  – рассматриваемая глубина, м;  $\lambda = 0,43$  – коэффициент бокового давления при коэффициенте Пуассона  $\mu = 0,3$ .

### Обоснование геомеханической модели

Многолетняя практика ведения горных работ на шахтах ДОН ГОКа показала, что на глубинах, превышающих 500–600 м, деформационные процессы, протекающие в массиве серпентинизированных пород, не соответствуют геомеханической модели деформирования сплошной упругой изотропной среды. Наиболее наглядным примером является факт продолжающегося роста деформаций приконтурного породного массива (конвергенция) по мере удалении забоя на расстояние, значительно превышающее значения 1–1,5 ширины проходимой выработки. Кроме того, фиксация смещений деформационных реперов, установленных в приконтурных скважинах, также

свидетельствует о наличии деформаций массива на расстояниях, на которых они должны отсутствовать согласно моделям однородной упругой среды [14].

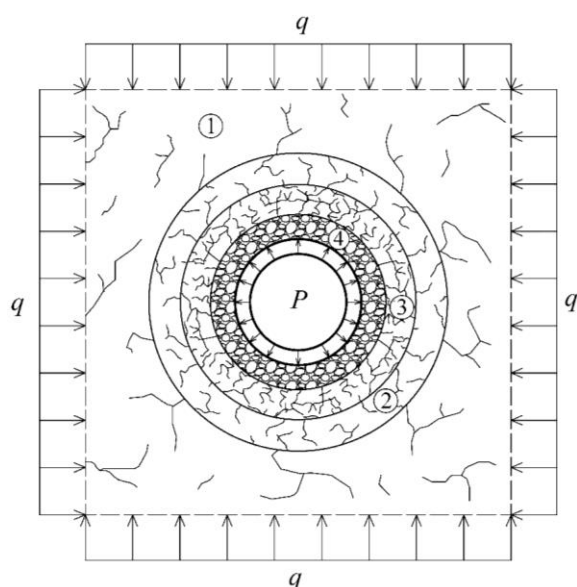
Также стоит отметить и неприменимость для данных условий реологических моделей формирования НДС массива, которые предусматривают учет вязкости и ползучести деформируемой среды, на что указывали следующие факты:

1. Отсутствие постепенного роста смещений приконтурного массива горных выработок и нагрузок на крепь капитальных выработок за последние 40 лет подземной разработки на шахтах ДОН ГОКа противоречит расчетным значениям реологических моделей. Натурными исследованиями ИГД УрО РАН зафиксировано постепенное уменьшение напряжений в крепи со временем [15, 16].
2. По результатам замеров напряжений в крепи шахтных стволов установлено, что на глубине более 500–600 м при неизменных геологических условиях и параметрах крепи происходит резкий (в 5–6 раз) рост напряжений в крепи, связанное с увеличением зоны сдерживающего влияния забоя до 3–4 диаметров выработки. Соответственно, в разы увеличивается окружающая зона неупругих деформаций, что негативно сказывается на устойчивости прилегающих выработок.
3. По данным оптического бурскопического зондирования пород вокруг стволов и горизонтальных выработок установлено, что увеличение зоны неупругих деформаций является следствием нарушения сплошности и последующего запредельного деформирования вмещающего массива, проявляющегося в сдвиговых и ротационных смещениях структурных породных блоков размерами от нескольких сантиметров до 1,5–2 м на величину 1–1,5 см и более.
4. Результатами межблочных подвижек структурных блоков вмещающих пород в условиях запредельного деформирования являются неравномерные сосредоточенные нагрузки на крепь горных выработок, которые приводят к нарушению ее целостности, о чем свидетельствуют результаты исследований, полученные при разработке месторождений в сложных горно-геологических условиях [15, 16].

Вышеизложенное свидетельствует, что в напряженном вмещающем массиве скальных пород при проходке выработок происходило запредельное деформирование, но не в соответствии с реологическими моделями сплошной изотропной среды, а в условиях модели упругого деформирования и постепенного хрупкого разрушения массива с последующими взаимными перемещениями (переупаковкой) его структурных блоков. Таким образом, был сделан вывод, что в исследуемом массиве на глубинах свыше 500–600 м в напряженных массивах серпентинизированных горных пород главными факторами, определяющими формирование НДС крепи выработок, служат не процессы деформирования, а процессы постепенного разрушения окружающего породного массива [17, 18].

Вокруг проходимых выработок, вне зависимости от их формы, направленности и местоположения, формируются концентрические зоны с измененными геомеханическими характеристиками вмещающего массива, которые схематично можно подразделить на четыре типа (рис. 1):

- 1) зона ненарушенного массива (зона допредельного деформирования) с предельной прочностью на одноосное сжатие  $[\sigma]$ ;
- 2) переходная зона запредельного деформирования с постепенным снижением прочности разрушаемого массива от  $[\sigma]$  до  $[\sigma_0]$ ;
- 3) зона остаточной прочности разрушаемого массива с пределом прочности на одноосное сжатие  $[\sigma_0]=0,1[\sigma]$ ;
- 4) зона руинного разрушения с практически нулевой прочностью массива на одноосное сжатие.



**Рис. 1.** Схема формирования нагрузок на крепь горной выработки в модели постепенного деформирования и разрушения массива:  $q$  – внешние нагрузки;  $P$  – отпор крепи

**Fig. 1.** Scheme of formation of loads on the support of the mine workings in the model of gradual deformation and fracture of massif:  $q$  – external loads;  $P$  – reinforcement support

Формирование данных зон происходит не одновременно, а в течение некоторого времени, что отражается в процессах постепенно затухающих смещений контура выработки, фиксируемых при инструментальных наблюдениях, в том числе при удалении забоя на расстояния, превышающие значения 1–1,5 ширины проходимой выработки.

Для условий шахт Дон ГОКа процессы разрушения вмещающего массива серпентинизированных скальных пород дополнительно активизируются при доступе воздуха и щелочной воды. Однако исследования ИГД УрО РАН показали, что основным фактором формирования нагрузок на крепь являются силовые условия, а не геохимические. Это подтверждено замерами радиальных смещений породного контура

выработок и контура крепи, параметры которых в основном определялись размерами зон неупругого деформирования окружающих пород и реактивным отпором поддерживающей крепи, а не геохимическими процессами в закрепном пространстве [19].

#### Обоснование параметров зон взаимного влияния параллельных выработок

Более чем полувековой опыт экспериментально-аналитических исследований ИГД УрО РАН на шахтах Донского ГОКа [15, 20, 21] показал, что при проходке параллельных выработок оценка безопасного расстояния между ними сводится к расчету области запредельного деформирования, формирующейся вокруг каждой из выработок. В расчетах окружающий породный массив лучше всего отображать моделью хрупко-разрушающейся среды. Для определения нагрузок на крепь такая модель дает определенный «запас прочности», по сравнению с моделью хрупко-пластического деформирования, поскольку в ней зона неупругих деформаций, формирующаяся вокруг выработки, совпадает с зоной разрушенных пород (рис. 1) [22]. При этом определяющее значение имеет не форма контура выработки, а площадь ее поперечного сечения, выраженная через эквивалентный радиус.

Согласно известным аналитическим решениям плоской геомеханической задачи [23] имеем:

- радиус  $r$  зоны неупругого деформирования:

$$r = R \left[ \frac{\beta(2q - [\sigma]) + (\beta + 2)[\sigma_0]}{(\beta + 2)(\beta P + [\sigma_0])} \right]^{1/\beta}; \quad (1)$$

- радиальные смещения  $U$  контура выработки:

$$U = R \left[ \frac{(1 + \mu)(\beta q + [\sigma])}{E(\beta P + 2)} \right] r^2; \quad (2)$$

внешняя максимальная (вертикальная) нагрузка  $P_v$  на крепь от собственного веса налегающих разрушенных пород зоны неупругих деформаций:

$$P_v = \gamma(r - R), \quad (3)$$

где  $r$  – радиус (от центральной оси выработки) зоны разрушения и запредельного деформирования массива вмещающих горных пород (на рис. 1 это внешняя граница зон неупругих деформаций 2, 3, 4), м;

$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$  – эквивалентный радиус выработки, м;  $S$  –

площадь поперечного сечения выработки в проходке (вчерне),  $m^2$ ;  $q$  – наибольшие главные нормальные напряжения (для условий объемного равнокомпонентного поля) окружающего породного массива вы-

работки, МПа;  $\beta = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$  – параметр линеариза-

ции огибающей кругов Кулона–Мора;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $[\sigma]$  – предел длительной прочности (на одноосное сжатие) вмещающего выработку породного массива вне зоны неупругих деформаций, МПа;  $[\sigma_0]=0,1[\sigma]$  – предел остаточной прочности (на одноосное сжатие) нарушенного массива вмещающих пород в зоне неупругих деформаций, МПа;  $P$  – реактивный отпор поддержи-

вающей крепи, численно равный ее несущей способности, МПа;  $\gamma$  – объемный вес породного массива в зоне неупругих деформаций.

Для условий проходки выработок рудовор 2 очереди шахты «ДНК» в качестве исходных геомеханических характеристик были приняты следующие значения:

- предел длительной прочности вмещающего породного массива на одноосное сжатие для диапазона IV–V категорий устойчивости:  $[\sigma]=2\text{--}15$  МПа;
- предел остаточной прочности, соответственно:  $[\sigma_0]=0,1$   $[\sigma]=0,2\text{--}1,5$  МПа;
- главные нормальные напряжения  $q$  вмещающего породного массива определяются зависимостью  $\mathcal{H}$ ;

- угол внутреннего трения вмещающего породного массива:  $\varphi=30^\circ$  (соответственно,  $\beta=2$ );

Подстановкой исходных параметров в формулу (1) рассчитаны радиусы  $r$  зон неупругого деформирования вмещающегося породного массива, формирующихся в различных условиях вокруг капитальных выработок для всего диапазона проектных глубин 800–1428 м. Результаты расчетов, в графической форме представленные на рис. 2, показывают, что наиболее существенное влияние на размеры зоны неупругого деформирования и разрушения, формирующейся при проходке выработок рудовор 2 очереди, оказывает реактивный отпор поддерживающей крепи.

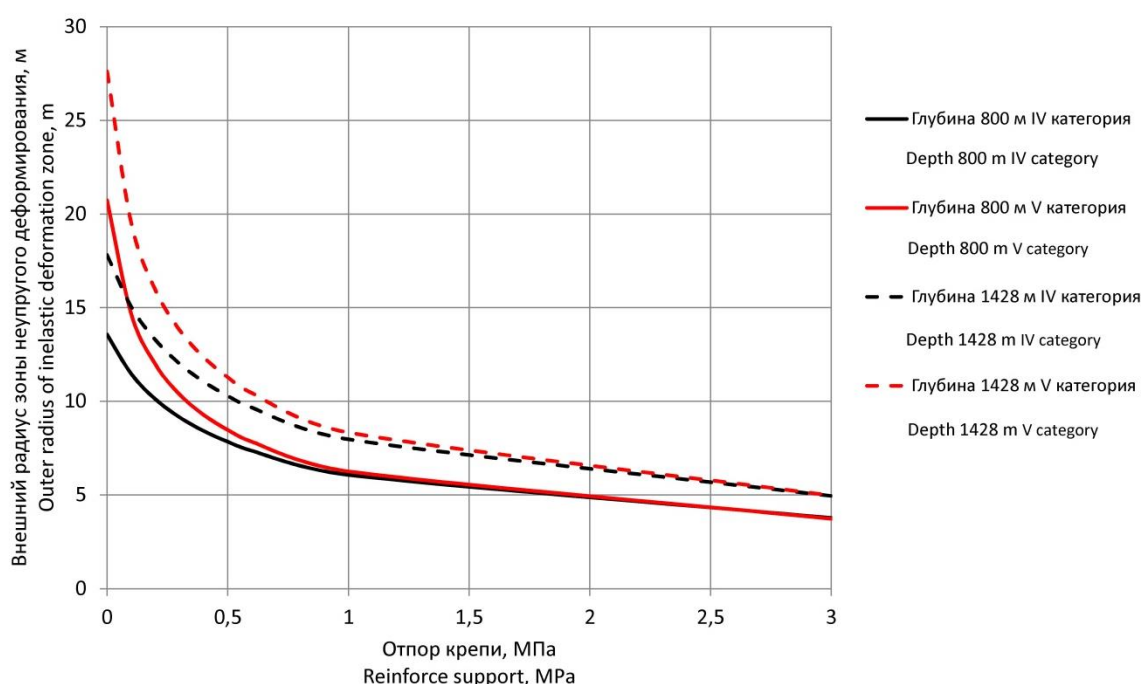


Рис. 2. Радиусы зоны неупругого деформирования массива в зависимости от величины отпора крепи при различных категориях устойчивости (на примере выработки эквивалентным радиусом  $R=2$  м)

Fig. 2. Radii of the inelastic deformation zone of the massif depending on the size of the reinforce support at different categories of stability (for example, production of equivalent radius  $R=2$  m)

Расчеты оптимальных значений отпора и, соответственно, несущей способности, вида и параметров крепи, выполнены известным методом [24] графического решения плоской задачи совместного деформирования системы «крепь–массив» для наиболее неблагоприятной ситуации: при коэффициенте  $\alpha^*$  сдерживающего влияния забоя равном единице. Определялись корни попарных комбинаций системы уравнений (2) и (3) для различных проектных параметров выработок 2 очереди шахты: глубин, в диапазоне от 800 до 1428 м и эквивалентных радиусов в диапазоне от 1 до 5 м для основных горно-капитальных выработок, проходимых в массивах IV и V категорий устойчивости.

В качестве примера на рис. 3 показано такое решение для выработок эквивалентным радиусом  $R=2$  м, проходимых на различных глубинах в условиях IV категории устойчивости. Точки пересечения соот-

ветствующих попарных комбинаций уравнений дают искомые значения оптимального отпора поддерживающей крепи  $P$  в диапазоне от 0,21 до 0,27 МПа.

Аналогичные решения для выработок эквивалентным радиусом  $R=5$  м в условиях IV категории устойчивости дают оптимальный отпор поддерживающей крепи  $P$  в 0,41...0,53 МПа, а при V категории устойчивости для выработок шириной 4 и 10 м диапазоны оптимального отпора крепи составляют  $P=0,24\text{--}0,31$  и  $P=0,45\text{--}0,57$  МПа, соответственно.

#### Обоснование регламента крепления

Полученные результаты натурных инструментальных исследований показали, что при проходке подземных выработок во вмещающих скальных породных массивах 4–5 категорий устойчивости формируются концентрические зоны с измененными геомеханическими характеристиками. При этом главным критери-

ем развития опасных геомеханических процессов, определяющих параметры геотехнической системы «крепь горной выработки – вмещающий породный массив», являются не процессы деформирования, а процессы разрушения, определяющие формирование в приконтурном массиве выработки концентрических

зон с измененными геомеханическими характеристиками. Управление зонами неупругого деформирования и разрушения, формирующимися вокруг проходимых выработок, предлагается осуществлять за счет реактивного отпора поддерживающей крепи, численно равного ее несущей способности.

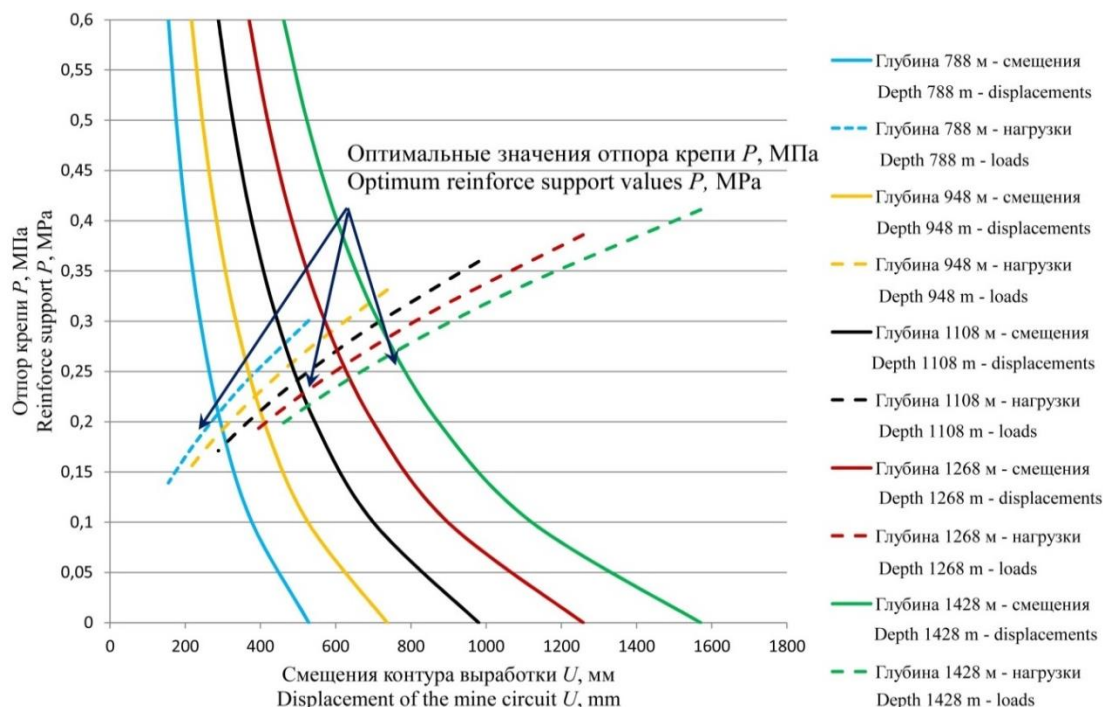


Рис. 3. Оптимальный отпор крепи выработки на различных глубинах (на примере выработки эквивалентным радиусом  $R=2$  м в условиях IV категории устойчивости)

Fig. 3. Optimal support for different depths of the mine (with an example of an equivalent radius  $R=2$  m under stability category IV conditions)

Для рассматриваемых условий проходки выработок рудяков 2 очереди шахты «ДНК» оптимальный отпор поддерживающей крепи находится в пределах 0,1...0,3 МПа, а для большеобъемных выработок дробильно-перепускных комплексов и других камер – 0,3...0,5 МПа (рис. 3). При этом вокруг выработок формируются зоны запредельного деформирования, внешние радиусы которых в 3...7 раз превышают поперечные размеры выработок в черне.

Требуемый отпор крепи, при котором размеры зон запредельного деформирования в процессе проходки выработок оказываются оптимальными, обеспечивается за счет использования в качестве временного крепления металлических арок из спецпрофиля СВП 17...27 с шагом установки рам от 0,5 до 1,3 м (в зависимости размеров конкретной выработки и горно-геологических и геомеханических условий) [25]. Выбор данного типа крепи обусловлен ее способностью сразу после возведения воспринимать на себя нагрузку со стороны массива, тем самым обеспечивая необходимый отпор и предотвращая развития зоны неупругого деформирования приконтурного массива.

Использование монолитной железобетонной крепи (рамы СВП + бетон) возможно только в качестве постоянной с отставанием от забоя на расстояние не менее 3–4 ширины выработки.

Виды и параметры временной и постоянной крепи сближенных выработок представлены в таблице. Однако предлагаемые параметры крепи можно варьировать, тем самым изменяя уровень отпора крепи и размеры зоны неупругого деформирования. Если сближенные выработки не попадают в зону взаимного влияния, то их проходка может производиться одновременно или с некоторым отставанием.

При отсутствии возможности исключить взаимное влияние выработок путем их разноски друг от друга на расстояние, превышающее радиус зоны разрушения окружающего массива, необходимо соблюдать очередность проходки и крепления выработок, после реализации основных деформационных процессов в приконтурном массиве. Первую одиночную выработку следует крепить только с применением временной крепи. Постоянная крепь не возводится. Затем производится проходка и крепление второй выработки, которая будет находиться в зоне неупругого деформирования, сформировавшейся в процессе проходки первоначальной выработки. После окончания строительства второй выработки производится визуальный осмотр первой выработки на предмет нарушений приконтурного массива и целостности временной крепи. При выявлении каких-либо нарушений выполняется ее ремонт, а затем возведение постоянной крепи.



**Таблица.** Выбор типа крепи по категориям устойчивости пород

**Table.** Selection of the type of support by rock stability categories

Категория устойчивости пород Category of rock stability	Ширина выработок Width of workings	Требуемые виды крепления Required support types	
		Постоянная Permanent	Временная Temporary
Неустойчивые (IV) Unstable (IV)	до 4 м up to 4 m	Монолитная железобетонная крепь (рамы СВП + бетонная крепь) Monolithic ferroconcrete support (SVP frames + concrete support)	Комбинированная крепь: металлические рамы СВП 17 (шаг установки не более 0,8 м) или СВП 22 (шаг установки не более 1,0 м) с затяжкой Combined support: metal frames SVP 17 (step of installation not more than 0,8 m) or SVP 22 (step of installation not more than 1,0 m) with tightening
	4–6 м/м	Монолитная железобетонная крепь (рамы СВП + бетонная крепь) Monolithic ferroconcrete support (SVP frames + concrete support)	Комбинированная крепь: металлические рамы СВП 22 (шаг установки не более 0,6 м) или СВП 27 (шаг установки не более 0,8 м) или СВП 33 (шаг установки не более 1,0 м) с затяжкой Combined support: metal frames SVP 22 (installation step no more than 0,6 m) or SVP 27 (installation step no more than 0,8 m) or SVP 33 (installation step no more than 1,0 m) with tightening
	более 6 м more than 6 m	Монолитная железобетонная крепь (рамы СВП + бетонная крепь) + различные виды анкерной крепи Monolithic ferroconcrete support (SVP frames + concrete support) + various types of anchor support	Комбинированная крепь: металлические рамы СВП 22 (шаг установки не более 0,6 м) или СВП 33 (шаг установки не более 1,0 м) с затяжкой + различные виды анкеров Combined support: metal frames SVP 22 (installation step no more than 0,6 m) or SVP 27 (installation step no more than 0,8 m) or SVP 33 (installation step no more than 1,0 m) with tightening + various types of anchors
Весьма неустойчивые (V) Highly unstable (V)	Требуется применение специальных методов проходки для перевода пород в более высокую IV категорию устойчивости, т. е. применение податливых крепей в комбинации с опережающими и предохранительными крепями (защитные экраны), либо необходимо инъецирование пород. The use of special sinking methods is required to transfer the rocks to a higher IV stability category, i. e. the use of flexible supports in combination with advance and safety supports (protective screens), or the injection of rocks is required		

При проходке сближенных выработок, одна из которых является большеобъемной с шириной более 6 м, первоочередной строящейся выработкой является большеобъемная, закрепленная постоянной железобетонной крепью. После чего выполняется проходка сближенной протяженной выработки, которая находится в зоне влияния первой выработки. При этом протяженная выработка крепится согласно таблице, чтобы зона деформирования, формирующаяся в процессе ее проходки, не оказала влияния на приконтурный массив большеобъемной выработки, тем самым предотвращая рост нагрузки на крепь и обеспечивая ее устойчивость.

#### Заключение

На основании экспериментально-аналитических исследований выполнено обоснование типов и парамет-

ров крепления параллельных взаимовлияющих выработок, сооружаемых в напряженных массивах трещиноватых скальных горных пород, с целью обеспечения целостности крепи как в процессе проходки, так и при последующей эксплуатации выработок. Разработан технологический регламент проходки и крепления такого типа выработок, в котором учтены процессы запредельного деформирования породного массива, происходящие вокруг каждой из выработок. Апробация и практическая реализация полученных технологических решений осуществляется в процессе строительства околоствольных дворов новой очереди шахты ДНК Донского горно-обогатительного комбината.

Работа выполнена в ходе реализации государственного задания по теме № 0405-2019-0007.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Саммал А.С., Грибанов В.Б., Капунова Н.А. Оценка напряженного состояния массива пород в окрестности двух параллельных круговых выработок, сооружаемых в общей зоне укрепления // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – № 3. – С. 323–331.
- Ларионов Р.И. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг двух параллельно проведенных тоннелей // Записки Горного института. – 2007. – Т. 172. – С. 78–81.
- Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Куранов А.Д. Метод прогноза напряженного состояния комплекса тоннельных выработок сложной пространственной конфигурации с учетом взаимного влияния и последовательности строительства // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 17–24.
- Deev P., Sammal A., Antziferov S. Evaluation of mine support stress state on base of convergence measurement data // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – Albena, Bulgaria, 2017. – P. 321–326.
- Islavath S.R., Deb D., Kumar H. Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2020. – V. 127. – P. 204–221.
- Elrawy W.R., Abdelhaffez G.S., Saleem H.A. Stability assessment of underground openings using different rock support systems // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. – 2020. – V. 35 (1). – P. 49–64.
- Measurement and analysis of the internal displacement and spatial effect due to tunnel excavation in hard rock / J. Wang, E. Li, L. Chen, Y. Han, C. Wang // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 84. – P. 151–165.
- Украинец В.Н. Совместное действие подвижных нормальной и скручивающей нагрузок на тоннель с круговой крепью // Известия Томского политехнического университета – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 58–61.

9. Исследование геодинамики массива в зоне сопряжения очистных и подготовительных выработок / В.И. Голик, В.И. Комащенко, Н.М. Качурин, Г.В. Стась // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 82–90.
10. Черданцев Н.В. Устойчивость анизотропного массива горных пород с системой двух спаренных выработок квадратного поперечного сечения // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 3. – С. 6–13.
11. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade quartz veins / A.D. Sashurin, A.A. Panzhin, T.F. Kharisov, D.Yu. Knyazev // Eurasian Mining. – 2016. – № 2. – P. 3–5.
12. Балец А.Е., Озорнин И.Л., Каюмова А.Н. Совместные замеры напряженного состояния и модуля упругости породного массива при проходке шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 30–45.
13. Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different supporting conditions in deep roadway during excavation period / Z. Xie, N. Zhang, X. Feng, Q. Wei, M. Weng // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 123. – № 104122.
14. Hedayat A., Weems J. The elasto-plastic response of deep tunnels with damaged zone and gravity effects // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2019. – V. 52 (12) – P. 5123–5135.
15. Балец А.Е. Обоснование условий снижения напряжений в крепи шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 5 11. – С. 51–65.
16. Effect of unloading velocity on surrounding rock deformation / G. Hou, J. Liang, M. Zhou, Y. Cui // Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society. – 2019. – V. 44 (4). – P. 1011–1019.
17. Investigation of deep mine shaft stability in alternating hard and soft rock strata using three-dimensional numerical modeling / X. Sun, G. Li, C. Zhao, Y. Liu, C. Miao // Processes. – 2019. – V. 7. – № 2. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/1/2> (дата обращения 01.09.2020).
18. Investigation of shaft stability and anisotropic deformation in a deep shaft in Idaho, United States / G. Walton, E. Kim, S. Sinha, G. Sturgis, D. Berberick // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – V. 105. – P. 160–171.
19. Deformation processes, textural evolution and weakening in retrograde serpentinites / C. Viti, C. Colletini, T. Tessei, M.S. Tarling, S.A.F. Smith // Minerals. – 2018. – V. 8 (6). – № 241. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/1/2/htm> (дата обращения 01.09.2020).
20. Результаты фундаментальных и прикладных научных исследований ИГД УрО РАН за 2012–2016 гг. / С.В. Корнилов, В.Л. Яковлев, А.В. Глебов, А.А. Панжин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 1 (1405). – С. 98–103.
21. Сашурин А.Д. Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород // Проблемы недропользования. – 2015. – № 1 (4). – С. 38–44.
22. Соловьев В.А., Аптуков В.Н., Ваулина И.Б. Поддержание горных выработок в соляных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 2. – С. 344–356.
23. Балец А.Е. Особенности формирования напряжений в крепи вертикальных выработок в условиях запредельного напряженно-деформированного состояния скальных породных массивов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 202–212.
24. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Изд-во «Недра», 1992. – 543 с.
25. Modelling of closed steel supports for underground and mining works / P. Janas, K. Janas, L. Koubova, M. Krejsa // Key Engineering Materials. – 2017. – V. 754. – С. 313–316.

Поступила 08.09.2020 г.

#### Информация об авторах

**Харисов Т.Ф.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН.

**Балец А.Е.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела УрО РАН.

**Озорнин И.Л.**, заведующий лабораторией геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН.

UDC 622.83

## JUSTIFICATION OF REGULATIONS FOR DRIVING PARALLEL MUTUALLY INFLUENCING MINE WORKINGS IN STRESSED CRACKED ROCKY MASSIFS

Timur F. Kharisov<sup>1</sup>,  
timur-ne@mail.ru

Aleksandr E. Balek<sup>1</sup>,  
balek@igdur.ru

Ivan L. Ozornin<sup>1</sup>,  
ivan.ozornin@igdur.ru

<sup>1</sup> Institute of Mining of Ural Branch of RAS,  
58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620075, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the necessity to account mutual influence of the mine workings constructed in the intense cracked massifs of rocks for preserving stability of the approached mine workings in the course of their building and operation.

**The aim** of study is to estimate the size of the deformation zone formed around a single horizontal mine workings during its construction with subsequent justification of the types and parameters of support, ensuring their stability. On the basis of the results of experimental and analytical studies of the «fastener–massif» system deformation, which were obtained and accumulated over 50 years in the course of construction of workings in the massif of chromite deposits of the Don Mining and Processing Complex, the assessment of stress-strain state of the rock massif on the scale of the mine field was made and the geomechanical model of the massif, which is characterized by gradual brittle destruction of rocks and subsequent crossovers, was justified.

**Results.** The radii of deformation zones of the massif formed in different conditions around capital excavations for the whole range of design depths of the investigated field have been determined by the calculated method. The interval of optimum values of the repulse and, accordingly, bearing capacity of the support, providing reduction of radiuses of deformation zones around the horizontal extended and large-volume excavations of crushing and bypass complexes, was determined. Technological regulations for driving and fastening of such workings are developed, which take into account the processes of rock deformation that occur around each workings. Justification of types (special profile of CVP 17÷27) and parameters of attachment of parallel mutually influencing workings under conditions of the massif under study, providing the required repulse and stability of the close workings, both in the process of driving and subsequent operation, was made. Testing and practical implementation of the obtained technological solutions is currently being carried out in the process of construction of near-barrelled yards of the new stage of the mine DNK of the Donsk Mining and Processing Integrated Works.

### Key words:

Massif, in situ research, stress-strain state, structural structure, hierarchical block structure.

The research was carried out when implementing the State task on the topic no. 0405-2019-0007.

### REFERENCES

1. Sammal A.S., Gribanov V.B., Kapunova N.A. Otsenka napryazhennogo sostoyaniya massiva porod v okrestnosti dvukh parallelnykh krugovykh vyrabotok, sooruzhaemykh v obshchey zone ukrepleniya [Stress state estimation of the rock massif in the vicinity of two parallel circular openings to be erected in the common area strengthen]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki*, 2013, vol. 3, pp. 323–331.
2. Larionov R.I. Issledovanie formirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod vokrug dvukh parallelnykh provedennykh tonneley [Investigation of the stress-strain state formation of a massif of rocks around two parallel tunnels]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2007, vol. 172, pp. 78–81.
3. Protosenya A.G., Belyakov N.A., Kuranov A.D. Metod prognoza napryazhennogo sostoyaniya kompleksa tonnelnykh vyrabotok slozhnoy prostranstvennoy konfiguratsii s uchetom vzaimnogo vliyaniya i posledovatel'nosti stroitel'stva [The prediction technics of tunnel sets with complex three dimensional configuration stress state with allowance for relative influence and building sequence]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2012, vol. 199, pp. 17–24.
4. Deev P., Sammal A., Antziferov S. Evaluation of mine support stress state on base of convergence measurement data. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings*. Albena, Bulgaria, 2017. pp. 321–326.
5. Islavath S.R., Deb D., Kumar H. Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, vol. 127, pp. 204–221.
6. Elrawy W.R., Abdelhaffez G.S., Saleem H.A. Stability assessment of underground openings using different rock support systems. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 2020, vol. 35 (1), pp. 49–64.
7. Wang J., Li E., Chen L., Han Y., Wang C. Measurement and analysis of the internal displacement and spatial effect due to tunnel excavation in hard rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 84, pp. 151–165.
8. Ukrainec V.N. Cojoint effect of mobile normal and torque loads on tunnel with circular support. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 1, pp. 58–61. In Rus.
9. Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M., Stas G.V. Research of array geodynamics in the interface of cleaning and preparatory works. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 82–90.
10. Cherdancev N.V. Stability of anisotropic rock massif with two adjacent square cross-section openings system. *Industrial safety*, 2016, no. 3, pp. 6–13. In Rus.
11. Sashurin A.D., Panzhin A.A., Kharisov T.F., Knyazev D.Yu. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade quartz veins. *Eurasian Mining*, 2016, no. 2, pp. 3–5.
12. Balek A.E., Ozornin I.L., Kayumova A.N. Joint measurements of the stress state and modulus of elasticity of the rock mass during sinking shafts. *Mining informational and analytical bulletin*, 2020, no. 4, pp. 30–45.
13. Xie Z., Zhang N., Feng X., Wei Q., Weng M. Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different

- supporting conditions in deep roadway during excavation period. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 123, no. 104122.
14. Hedayat A., Weems J. The elasto-plastic response of deep tunnels with damaged zone and gravity effects. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, vol. 52 (12), pp. 5123–5135.
  15. Balek A.E. Substantiation of conditions to decreasing of the lining of mining shafts. *Mining informational and analytical bulletin*, 2011, no. 51, pp. 51–65. In Rus.
  16. Hou G., Liang J., Zhou M., Cui Y. Effect of unloading velocity on surrounding rock deformation. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 2019, vol. 44 (4), pp. 1011–1019.
  17. Sun X., Li G., Zhao C., Liu Y., Miao C. Investigation of deep mine shaft stability in alternating hard and soft rock strata using three-dimensional numerical modeling. *Processes*, 2019, vol. 7, no. 2. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/1/2> (accessed 1 September 2020).
  18. Walton G., Kim E., Sinha S., Sturgis G., Berberick D. Investigation of shaft stability and anisotropic deformation in a deep shaft in Idaho, United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, vol. 105, pp. 160–171.
  19. Viti C., Colletini C., Tesei T., Tarling M.S., Smith S.A.F. Deformation processes, textural evolution and weakening in retrograde serpentinites. *Minerals*, 2018, vol. 8 (6), no. 241. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/1/2/htm> (accessed 1 September 2020).
  20. Kornilkov S.V., Yakovlev V.L., Glebov A.V., Panzhin A.A. Rezultaty fundamentalnykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy IGD UrO RAN za 2012–2016 gg. [Results of basic and applied scientific research by IGD RAS 2012–2016]. *Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*, 2017, no. 1 (1405), pp. 98–103.
  21. Sashurin A.D. Forming stressed-deformed state of hierarchically unitized rock mass. *Subsurface Exploitation Issues*, 2015, no. 1 (4), pp. 38–44. In Rus.
  22. Solovov V.A., Aptukov V.N., Vaulina I.B. Support of mining workings in saliferous rocks. *Mining informational and analytical bulletin*, 2017, no. 2, pp. 344–356. In Rus.
  23. Balek A.E. Features of formation of stress state in support of vertical openings in hard rock masses in the post-limit stress-strain state. *Mining informational and analytical bulletin*, 2014, no. 11, pp. 202–212. In Rus.
  24. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy i konstruksii krepey* [Mechanics of underground structures and structures of supports]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 543 p.
  25. Janas P., Janas K., Koubova L., Krejsa M. Modelling of closed steel supports for underground and mining works. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 754, pp. 313–316.

Received: 8 September 2020.

#### Information about the authors

**Timur F. Kharisov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS.

**Aleksandr E. Balek**, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS.

**Ivan L. Ozornin**, head of the laboratory, Institute of Mining of Ural Branch of RAS.

УДК 622.271.3.06:658.527

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛИЧНО-ПОТОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ КАРЬЕРОВ

Журавлев Артем Геннадиевич<sup>1</sup>,  
juravlev@igduran.ru

Семенкин Александр Владимирович<sup>1</sup>,  
semenkin@igduran.ru

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,  
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

**Актуальность** исследования заключается в том, что применение циклично-поточной технологии в рациональных для нее условиях позволяет заметно сократить затраты на транспортирование горной массы, однако имеет особенности и ограничения, в частности большой объем капитальных затрат. Поэтому необходимо применение методик, обеспечивающих достоверный расчет окупаемости проекта и оптимизацию его технико-экономических параметров.

**Цель:** на основе анализа чистого дисконтированного дохода установить области экономического применения комплексов циклично-поточной технологии в сравнении с экскаваторно-автомобильными комплексами.

**Объекты:** горнотехнические факторы комплексов циклично-поточной технологии и экскаваторно-автомобильных комплексов (годовая производительность, высота подъема горной массы, вид транспортируемой горной массы, технологические особенности размещения дробильно-конвейерного комплекса в карьерном пространстве)

**Методы:** научный и технико-экономический анализ, графоаналитический.

**Результаты.** Приводится обзор применения современных комплексов циклично-поточной технологии на карьерах России. Показаны результаты расчета экономического эффекта от применения комплексов циклично-поточной технологии в сравнении с экскаваторно-автомобильными комплексами по методике, разработанной в ИГД УрО РАН. В результате исследования определен срок окупаемости дополнительных инвестиций на вскрышной комплекс циклично-поточной технологии с разном борта карьера, учитывающий дисконтирование затрат, при различных технологических параметрах (высота подъема горной массы от 180 до 680 м, годовая производительность комплексов от 5 до 30 млн т/год). Показано изменение разницы чистого дисконтированного дохода по вариантам циклично-поточная технология-экскаваторно-автомобильный комплекс в зависимости от горнотехнических параметров комплексов. Установлена область наиболее экономичного применения циклично-поточной технологии с ленточными конвейерами стандартного уклона (до 16°) при разноразном борта карьера под дробильно-конвейерный комплекс по затратам на транспорт.

### Ключевые слова:

Циклично-поточная технология, дробильно-конвейерный комплекс, технико-экономическое сравнение, область применения, ленточный конвейер.

### Введение

В ближайшей перспективе более распространенным направлением развития мировой горной промышленности считается открытый способ разработки месторождений. В России открытым способом добывается 91 % железных руд, более 70 % руд цветных металлов, более 60 % угля [1]. Стоимость транспортирования горной массы занимает большую часть общей стоимости добычи [2, 3]. Применение циклично-поточной технологии в рациональных для него условиях позволяет заметно сократить затраты на транспортирование горной массы в сравнении с наиболее широко используемым автомобильным транспортом [4–6], однако имеет особенности и ограничения, в частности большой объем капитальных затрат. Поэтому, несмотря на значительные преимущества, пока ограниченно применяется на горнодобывающих предприятиях. Тем не менее в последние годы вновь возросло количество реализуемых проектов на отечественных карьерах. Ниже приведены некоторые примеры.

Однако дальнейшее развитие эффективной разработки месторождений открытым способом зависит не только от применения различных видов горнотранс-

портного оборудования, но и от внедрения на карьерах современных автоматизированных систем управления горнотранспортными комплексами [1].

В 2015 г. Оленегорский ГОК запустил дробильно-конвейерный комплекс (ДКК) с крутонаклонным конвейером (КНК). Инвестиции компании «Северсталь» в реализацию проекта составили более 750 млн р. По оценкам за восемь лет работа комплекса с КНК должна снизить операционные и инвестиционные затраты почти на 1,8 млрд р. за счет уменьшения транспортных расходов, сокращения парка автосамосвалов. КНК возведен в Оленегорском карьере с отметки –65 м до отметки +60 м (корпус крупного дробления), имеет высоту 125 м, длину 252 м и генеральный угол наклонной части 36°. Руда поставляется КНК в ранее существовавший комплекс ЦПТ. Годовая производительность комплекса по руде после крупного и среднего внутрикарьерного дробления составляет до 5,7 млн т железной руды [7].

На Михайловском ГОКе строятся ДКК на юго-восточном борту карьера. Дробильно-перегрузочное устройство (ДПУ), расположенное на глубине более 200 м, будет осуществлять приемку руды с автосамосвалов, дробление её до фракции размером 150 мм и

доставку по подземной галерее до КНК. Угол наклона КНК с прижимной лентой составляет 37 градусов, высота подъема – 215 м. Ввод в эксплуатацию ДКК в южной части карьера Михайловского ГОКа запланирован на 2020 г. Производительность по руде – около 15 млн т/год. Второй этап по строительству крутонаклонного конвейерного подъемника в центральной части карьера производительностью 35 млн т/год планируется завершить в 2023 г. [8]. Инвестиции в проект составят около 11,5 млрд р. [9]. Комплекс мероприятий позволит сократить затраты на транспортировку горной массы за счёт оптимизации технологической схемы карьерного транспорта, сокращения количества перегрузочных пунктов и погрузочного оборудования, уменьшения расстояния перевозок руды железнодорожным транспортом.

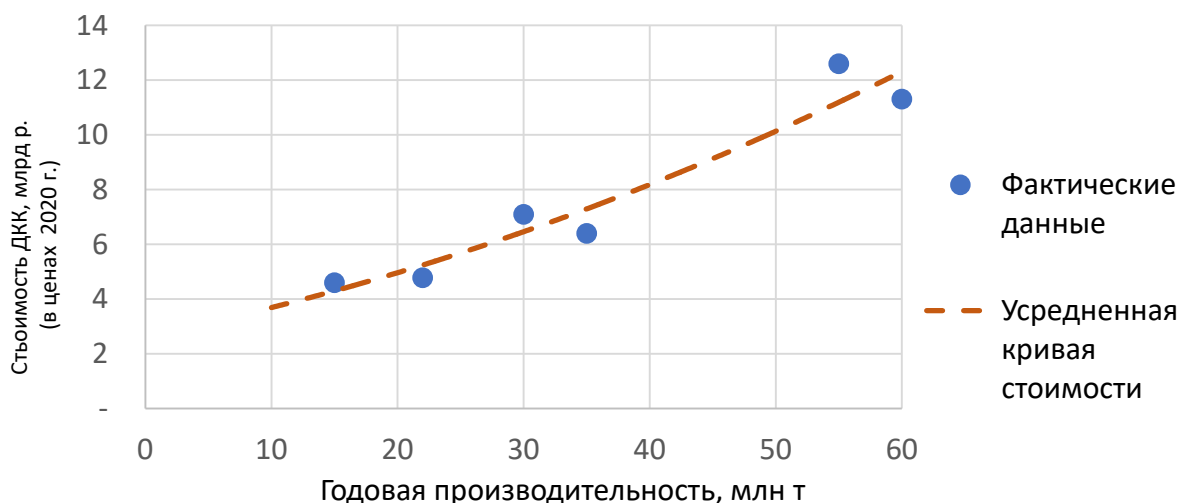
Внедрение циклично-поточной технологии (ЦПТ) планируется и на другом объекте «Металлоинвеста» – Лебединском ГОКе, инвестиции составят порядка 12,6 млрд р. По проектным оценкам ввод ЦПТ позволит сократить производственную себестоимость концентрата на 17 % к 2025 г. относительно 2018 г. и обеспечить транспортировку горной массы на фабрику в объеме 55 млн т/год [8].

Одним из современных примеров применения ЦПТ с традиционным ленточным конвейером на карьерах России служит Михеевский ГОК [10]. Михеевское месторождение медно-порфировых руд входит в число 50 крупнейших месторождений мира, его запасы оцениваются в 629 млн т руды. Мощность переработки руды на Михеевском ГОКе – до 27 млн т в год [11]. Горная масса из забоев транспортируется автосамосвалами на Дробильно-перегрузочный пункт

(ДПП), расположенный на борту карьера. Дробление осуществляется в гирационной дробилке, следом руда через бункер подается питателями на передаточный и далее на магистральный ленточный конвейер, доставляющий дробленую руду на склад. Длина ленточного конвейера, расположенного в крытой галерее, составляет 1500 м.

Анализ информации об инвестиционных затратах крупных горнодобывающих компаний в строительство комплексов ЦПТ, приводимых в открытых публикациях, показал, что зависимость инвестиций от производственной мощности ДКК близка к прямо пропорциональной с тенденцией к более интенсивному возрастанию в области высоких производительностей (50–60 млн т/год). Вероятно, это связано с уникальностью (в определенной мере) таких технических решений и, соответственно, большей их удельной стоимостью.

Установлено, что характер зависимости капитальных затрат, рассчитанных в ходе теоретических исследований ИГД УрО РАН [12], схож с вышеприведенными фактическими данными рис. 1. Однако для детального анализа требуется рассматривать зависимость технико-экономических показателей не только от производительности, но и от других ключевых факторов: высоты подъема, протяженности конвейера, типа конвейеров (угол наклона, ширина и скорость движения ленты), пропускной способности и степени дробления ДПУ и др. В связи с этим расчетные технико-экономические модели циклично-поточной технологии являются важным инструментом в условиях расширяющегося их внедрения на отечественных горнодобывающих предприятиях.



**Рис. 1.** Оценка зависимости инвестиций в дробильно-конвейерный комплекс от его производственной мощности (по данным открытых публикаций)

**Fig. 1.** Assessment of the dependence of investment in a crushing and conveyor complex on its production capacity (according to open publications)

Перспективным направлением в обосновании транспортных систем карьеров является их оптимизация под конкретные условия эксплуатации на основе компьютерного моделирования [13]. Опыт ИГД УрО РАН показывает, что детальный анализ горно-

геологических и горнотехнических условий карьера, особенностей организации ведения горных работ и правильный выбор позволяют не только оптимизировать затраты и повысить эффективность ЦПТ благоприятных условиях эксплуатации, но и обосновать

такие параметры комплексов, которые позволяют расширить границы их эффективного применения в сложных горнотехнических условиях. Это возможно благодаря применению научно обоснованных методик.

Выполненный комплекс исследований позволил создать достаточно простую и удобную на практике экспресс-методику оценки эффективности ЦПТ. Она позволяет оценить затраты в сравнении с автомобильным транспортом в широком диапазоне условий как в относительных единицах, так и с выходом на общепринятые показатели, в том числе чистый дисконтированный доход (ЧДД). Поскольку базовая часть уже изложена в ряде статей [12, 14, 15], ниже приведены итоговые показатели экономической эффективности ЦПТ, отражающие диапазон горнотехнических условий ее применения в современных условиях.

#### Методика исследований

Стоимостные показатели приняты на 2020 г. по предприятиям-аналогам. Области экономичного применения комплексов ЦПТ в сравнении с экскаваторно-автомобильными комплексами определялись путем сравнения ЧДД по вариантам. Расчет ЧДД для всех рассматриваемых вариантов проведен с идентичными горнотехническими условиями, что позволит достоверно сравнивать варианты. ЦПТ сравнивается с технологическим карьерным автотранспортом (экскаваторно-автомобильным комплексом, далее – ЭАК).

Разница между вскрышными и рудными комплексами заключается в том, что применение ЦПТ подразумевает внутрикарьерное дробление горной массы вне зависимости от ее вида (рудные или вскрышные породы). При использовании ЭАК вскрышные породы транспортируются из карьера в отвал без дробления, а руда поступает на стадию крупного дробления дробильно-обогадательной фабрики (ДОФ), соответственно, затраты на участок крупного дробления включены в вариант ЭАК. Поэтому затраты на дробильное оборудование ЭАК учитываются только на рудном комплексе.

В вариантах ЦПТ высота подъема горной массы от забоя до перегрузочного пункта автосамосвалами принята 80 м. Исследуются комплексы ЦПТ с двумя вариантами схемы расположением в карьере:

- традиционная с разном борта под конвейерную траншею;
- специальная, предполагающая минимум горно-капитальных работ, выполняемая без разноразборта карьера [14].

Для расчета технологических параметров ЦПТ и ЭАК использована методика, изложенная в работах [12, 14, 15].

Параметры комплексов ЦПТ и ЭАК представлены в табл. 1, 2, а технологические схемы транспорта – на рис. 2. В качестве ДПУ рассматриваются стационарные установки, монтируемые на железобетонных конструкциях, на базе дробилок производства «Уралмашзавод» [16]. Могут применяться и полустационарные переносимые ДПУ на модульных металлоконструкциях, например, описанные в [17].

Расчет ЧДД выполняется по известной формуле [18]:

$$\text{ЧДД}(NVP) = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t},$$

где  $CF_t$  (**Cash Flow**) – потоки денежных средств в конкретный период проекта, которые представляют собой разность притоков и оттоков денежных средств в каждом конкретном периоде  $t$ ;  $r$  – ставка дисконта, %;  $t$  – период времени, лет.

$$CF = D - \Delta_3 - K_3,$$

где  $D$  – доходная часть, р.;  $\Delta_3$  – эксплуатационные затраты, р.;  $K_3$  – капитальные затраты, р.

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^n \frac{D - \Delta_3 - K_3}{(1+r)^t}.$$

При сравнении только транспортных систем, зачастую доходная часть неизвестна. Однако, если привести оба рассматриваемых варианта к сопоставимым видам (условиям), доходные части будут идентичны (одинаковый объем перевозок и стоимость товарной продукции). При этом формула для оценки эффективности применения ЦПТ по разнице между ЧДД на комплекс ЦПТ и ЧДД на ЭАК примет вид:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД}_\Delta &= \text{ЧДД}_{\text{ЦПТ}} - \text{ЧДД}_{\text{ЭАК}} = \sum_{t=0}^n \frac{D_{\text{ЦПТ}}}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{D_{\text{ЭАК}}}{(1+r)^t} + \\ &+ \sum_{t=0}^n \frac{-\Delta_{3(\text{ЦПТ})} - K_{3(\text{ЦПТ})}}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{-\Delta_{3(\text{ЭАК})} - K_{3(\text{ЭАК})}}{(1+r)^t} = \\ &= \sum_{t=0}^n \frac{-\Delta_{3(\text{ЦПТ})} - K_{3(\text{ЦПТ})}}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{-\Delta_{3(\text{ЭАК})} - K_{3(\text{ЭАК})}}{(1+r)^t}. \end{aligned}$$

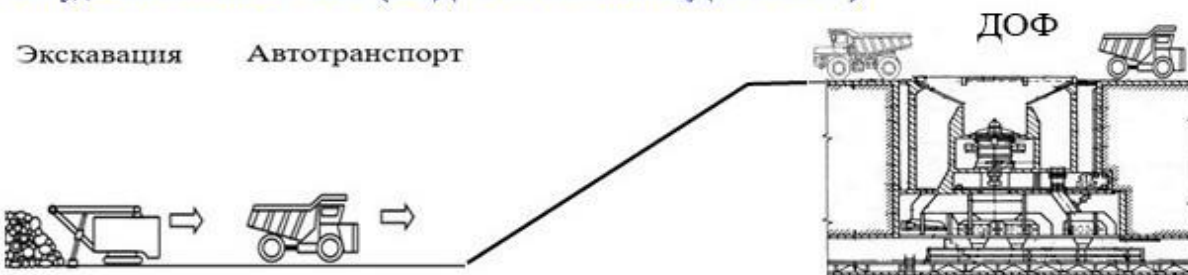
#### Результаты исследования

Ниже приведены графики, отражающие результаты расчета разницы чистых дисконтированных доходов между вариантами ЦПТ и ЭАК. ЦПТ характеризуется более высокими капитальными затратами на оборудование и возведение дробильно-конвейерного комплекса, которые не компенсируются снижением затрат на меньший парк автосамосвалов. В то же время эксплуатационные затраты в варианте ЦПТ меньше, чем при автомобильном транспорте, поэтому график разницы ЧДД с накопительным итогом соответствует классическому графику ЧДД, когда сформированный в первый период отрицательный результат от капиталовложений с течением времени компенсируется экономией затрат.

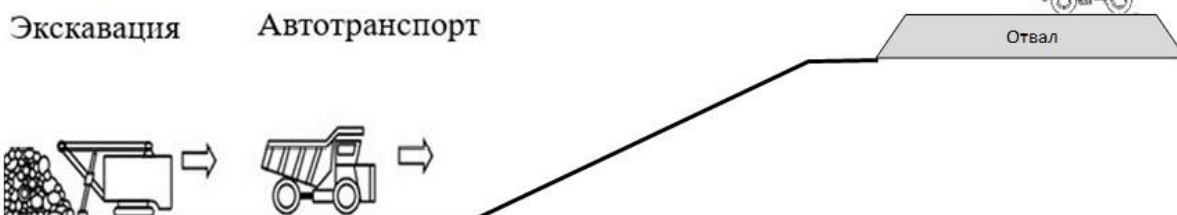
Для примера на рис. 3 приведены результаты расчетов для вскрышного комплекса ЦПТ производительностью 20 млн т/год при размещении в карьере с разном борта в сравнении с вскрышным ЭАК. Видно, что с ростом высоты подъема стоимость ДКК возрастает, а потому точка минимума  $\text{ЧДД}_{(\text{ЦПТ}-\text{ЭАК})}$  смещается вниз, достигая при 680 м (из них 80 м – высота подъема автотранспортом) пятикратной величины относительно варианта с высотой 280 м. В то же время чем больше высота подъема, тем больше сокращение эксплуатационных затрат, поэтому кривые  $\text{ЧДД}_{(\text{ЦПТ}-\text{ЭАК})}$  нарастают интенсивнее, обеспечивая в длительной перспективе больший экономический эффект.



### I. Рудный комплекс ЭАК (ККД-1500/180 или ЩДП-15х21У)



### II. Вскрышной комплекс ЭАК



### III. Рудный комплекс ЦПТ (ККД-1500/180)



### IV. Рудный комплекс ЦПТ (ЩДП-15х21У)



### V. Вскрышной комплекс ЦПТ (на примере ККД-1500/180)



Рис. 2. Технологические схемы транспорта по вариантам  
 Fig. 2. Technological schemes of transport by options

Таблица 1. Оборудование в ЭАК

Table 1. Equipment in the excavator and automobile complex (EAC)

Годовая производительность, млн т/год Annual productivity, mln t/year	5	10	20	30
Высота подъема горной массы, м/Lifting height of the rock mass, m	180–680			
Расстояние транспортирования горной массы автосамосвалами, км Distance of rock mass transportation by trucks, km	Рудный комплекс/Ore complex – 4,6 Породный комплекс/Rock complex – 11,8			
Вместимость ковша экскаватора, м <sup>3</sup> /Excavator bucket capacity, m <sup>3</sup>	5	12	15	15
Число экскаваторов, шт./Number of excavators, pcs.	3	5	5	6
Грузоподъемность автосамосвала, т/Truck load capacity, t	45	90	130	130
Число автосамосвалов, шт./Number of trucks, pcs.	24–54	24–54	33–74	39–89
Рудный комплекс (дополнительно учитывается стоимость дробилки) Ore complex (additional cost of the crusher is taken into account)				
Тип дробилки рудного комплекса/Type of ore complex crusher	ЩЦП 15×21У		ККД-1500/180	
Число дробилок, шт./Number of crushers, pcs	1	2	1	2
Схема (по рис. 2)/Scheme (according to fig. 2)	I			

Таблица 2. Параметры оборудования в комплексах ЦПТ

Table 2. Parameters of the equipment in the complexes cyclic-flow technology (CFT)

Годовая производительность, млн т/год Annual productivity, mln t/year	5	10	20	30
Высота подъема горной массы, м Lifting height of the rock mass, m	180–680 (в т. ч. автотранспорт – 80 м) (including trucks – 80 m)			
Расстояние транспортирования горной массы конвейером, м Distance of transportation of rock mass on the conveyor, m	324–1944			
Тип дробилки/Type of crusher	ЩЦП 15×21У		ККД-1500/180	
Число дробилок, шт./Number of crushers, pcs	1	2	1	2
Число питателей, шт./Number of feeders, pcs	1	2	2	4
Схема (по рис. 2)/Scheme (according to fig. 2)	IV		III, V	
Оконечное оборудование ДКК Termination equipment of the crushing-conveyor complex	Рудный комплекс – нет/Ore complex is not Породный комплекс – отвалообразователь Rock complex – dumper			
Ширина ленты, м/Width of the belt, m	1	1	1,4	1,6
Длина става, м/Length of column, m	324–972	324–486	324–390	324
Число ставов, шт./Number of structures, pcs	1–2	1–4	1–5	1–6
Вместимость ковша экскаватора, м <sup>3</sup> /Excavator bucket capacity, m <sup>3</sup>	5	12	15	15
Число экскаваторов, шт./Number of excavators, pcs	3	5	5	6
Грузоподъемность автосамосвала, т/Truck load capacity, t	45	90	130	130
Число автосамосвалов, шт./Number of trucks, pcs	12	12–13	16–18	20–24

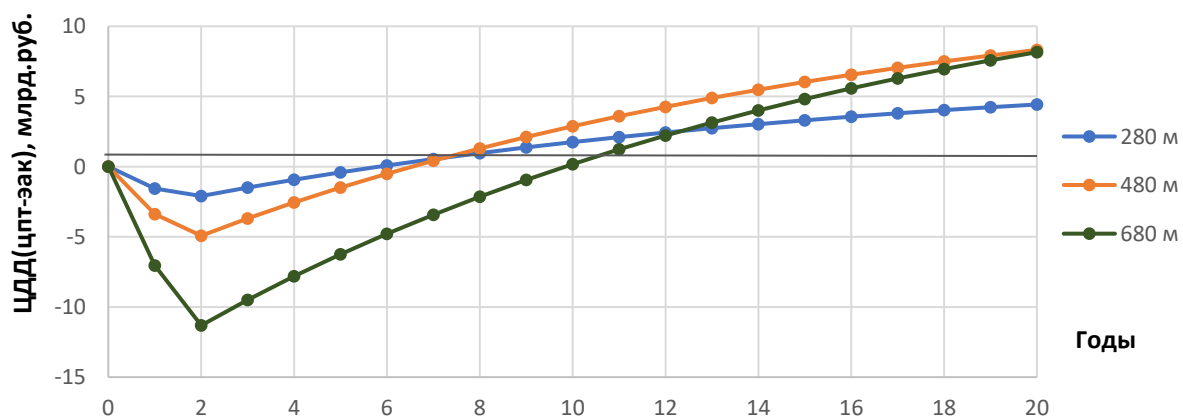


Рис. 3. Чистый дисконтированный доход при оценке дополнительных инвестиций в ЦПТ для породного комплекса производительностью 20 млн т/год, размещаемого с разносом борта, при разной высоте подъема

Fig. 3. Net present value when evaluating additional investments in the CFT for a rock complex with a capacity of 20 million tons/year placed with a spread of the Board, at different lifting heights

Данные закономерности объясняют тот факт, что срок окупаемости дополнительных инвестиций растет не столь интенсивно: для варианта 680 м при пятикратном росте капитальных затрат относительно варианта 280 м срок возврата инвестиций увеличивается всего в 1,7 раза. В целом сроки окупаемости для разных горнотехнических условий лежат в пределах

4–7 лет для наиболее часто применяемых на практике вариантов, в целом охватывая диапазон до 10 лет, а в отдельных случаях до 15 лет (рис. 4).

Закономерность изменения графика срока окупаемости на рис. 4 аналогична картине зависимостей экономического эффекта на рис. 5. Минимум срока окупаемости соответствует максимуму экономического эф-

факта. Отметим, на графиках рис. 3–5 приведены периоды возврата дополнительных затрат на комплекс ЦПТ в сравнении с комплексом автомобильного транспорта. Истинный срок окупаемости инвестиций может отличаться от приведенных сроков на графиках (рис. 3–5) как в меньшую, так и большую сторону в зависимости от доходной части денежного потока.

При разном сроке оценки отличаются и картины наиболее выгодных вариантов комплексов ЦПТ (рис. 5). Так, на горизонте планирования 5 лет область наибольшего экономического эффекта находится в пределах высот подъема до 200–500 м при производительности 10–20 млн т. При лаге в 8 лет максимумы смещаются в зону 250–600 м и 15–30 млн т/год.

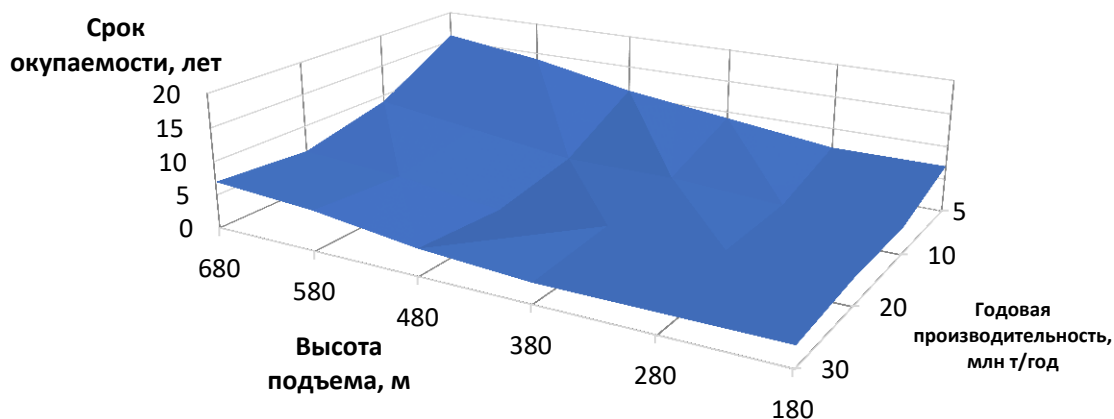


Рис. 4. Срок окупаемости дополнительных инвестиций на вскрышной комплекс ЦПТ с разносом борта карьера, учитывающий дисконтирование затрат, при различных технологических параметрах

Fig. 4. Payback period for additional investments in the overburden complex of the CFT with the spread of the quarry side, which takes into account the discounting of costs, under various technological parameters

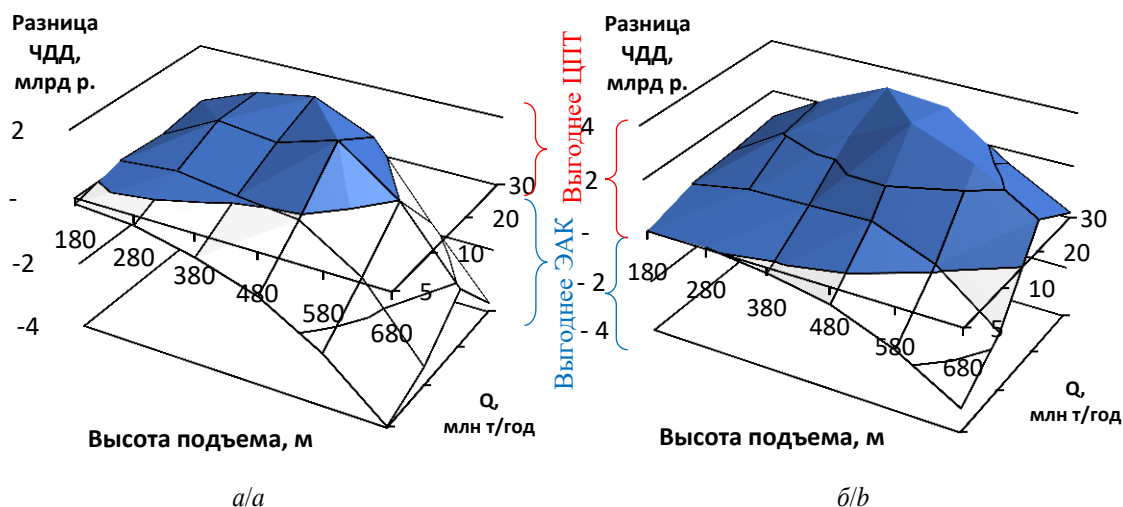


Рис. 5. Разница чистого дисконтированного дохода между вариантами «ЦПТ с разносом борта» и «ЭАК» при транспортировании вскрыши: а) срок оценки 5 лет; б) срок оценки 8 лет

Fig. 5. Difference in net present value between the options CFT with the spacing board and EAC during the transportation of overburden: а) evaluation period is 5 years; б) evaluation period is 8 years

Таким, образом использование методики ИГД УрО РАН позволяет не только выполнить оценку экономического эффекта в широком диапазоне горнотехнических условий, но и оптимизировать развитие транспортной системы во времени, рационально распределить инвестиционную нагрузку и максимизировать итоговый экономический эффект.

Рассмотрим более подробно различие вариантов схем размещения дробильно-конвейерных комплексов в карьерном пространстве (рис. 6). Основой экономического эффекта от применения конвейерного

транспорта является сокращение эксплуатационных затрат, обусловленное:

- кратным сокращением парка автосамосвалов;
- использованием вместо дорогостоящего дизельного топлива более дешевой электрической энергии;
- существенным снижением количества необходимого персонала и др.

Ограничением возможного эффекта является рост капитальных затрат. Если в карьере имеется возможность разместить ДКК при минимальном объеме гор-

но-капитальных работ, то инвестиции будут ниже, если же требуется разнос борта, то это накладывает ограничения как на возможную глубину ввода конвейера, так и на рентабельную производительность комплекса.

Результаты исследований области экономичного применения комплексов ЦПТ в сравнении с автомобильным транспортом представлены на рис. 6.

Варианты *а* и *б* без разноса борта показывают рост экономического эффекта с увеличением высоты подъема до 350–400 м и его стабилизацию до глубин 680 м. А вот разнос борта (рис. 6, *в*, *г*) оказывает существенное отрицательное влияние при больших глубинах, поэтому после аналогичного роста до 350–400 м эффект начинается снижаться уже при 550 м, заметно падая при относительных отметках 680 м.

Аналогичное влияние оказывает наращивание производительности ДКК: чем она больше, тем шире конвейер с возможным увеличением до двух параллельно размещаемых ставов. Это влияет на ширину конвейерной полутраншеи на борту карьера и приводит к соответствующему увеличению затрат на горно-капитальные работы. По графикам рис. 6, *в*, *г* видно, что разнос борта снижает эффективность ЦПТ после достижения пика при 20 млн т/год. В схемах без разноса борта такого эффекта не наблюдается.

Таким образом, показаны области эффективного применения комплексов ЦПТ в сравнении с ЭАК (рис. 6):

- рациональное размещения комплексов ЦПТ без разноса борта карьера имеет экономическую выгоду во всех рассмотренных горнотехнических условиях (рис. 6, *а*, *б*);
- область более экономичного применения ЦПТ в случае необходимости разноса борта под размещение ДКК определяются следующими границами: 5 до 17,5 млн т/год и высоте подъема горной массы от 300 до 680 м для вскрышного комплекса, для рудного комплекса при производительностях от 5 до 14,5 млн т/год и высоте подъема от 400 до 680 м (рис. 6, *в*, *г*).

Решением проблемы при невозможности разместить в карьер высокопроизводительный ДКК без разноса борта является пересмотр транспортной системы в сторону меньшего грузопотока на конвейерный транспорт и/или меньшей глубины установки дробильно-перегрузочного пункта, либо переход на крутонаклонные конвейеры различной конструкции [19–23] с оптимизацией схемы их установки.

Углубленный анализ зависимостей параметров и технико-экономических показателей ЦПТ от горнотехнических факторов, схем размещения ДКК и организации работы комплекса, который позволяет выполнить методика ИГД УрО РАН, обеспечивает эффективное внедрение ЦПТ на горнодобывающих предприятиях даже в сложных условиях, расширяя тем самым область ее применения.

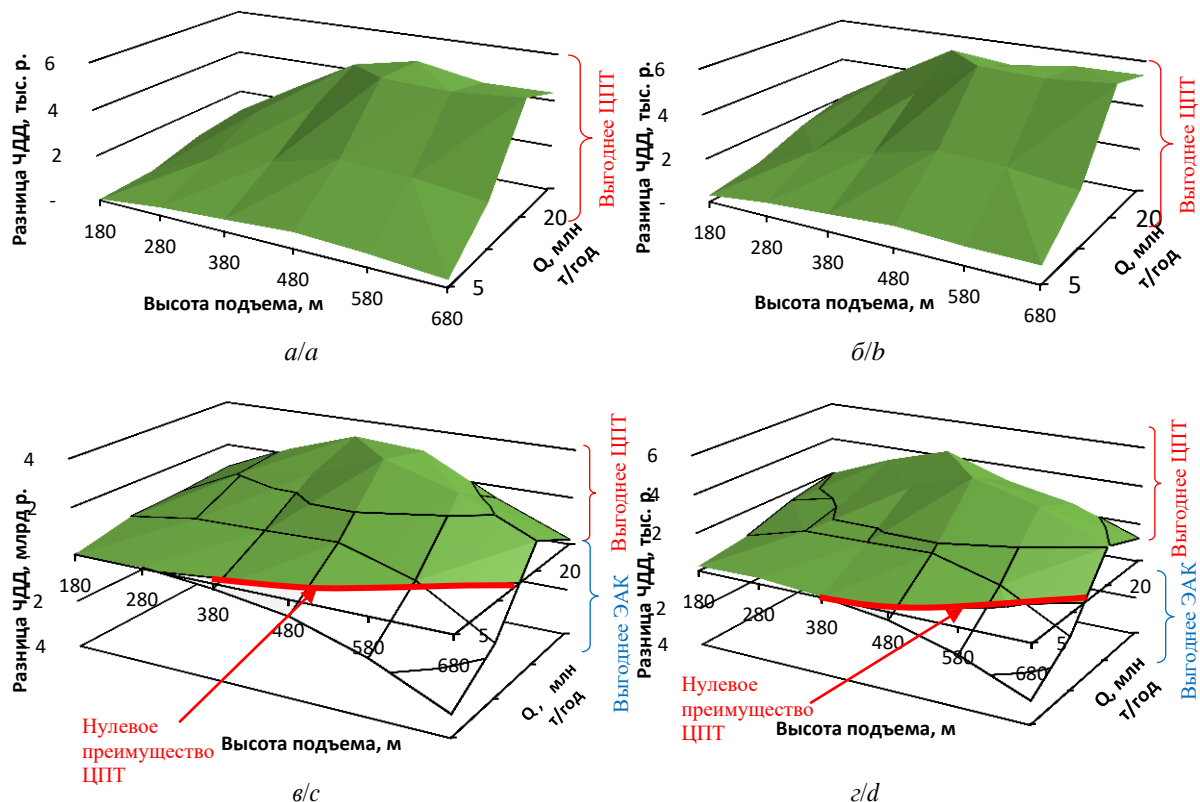


Рис. 6. Разница чистого дисконтированного дохода между вариантами использования ЦПТ и автомобильного транспорта: а) Вскрышной комплекс. Без разноса борта; б) Рудный комплекс. Без разноса борта; в) Вскрышной комплекс. С разносом борта; г) Рудный комплекс. С разносом борта

Fig. 6. Difference between the net present value between the options for using the CFT and automobile transport: a) Stripping complex. Without side spacing; b) Ore complex. Without side spacing; c) Stripping complex. With the spread of the Board; d) Ore complex. With the spread of the Board

## Выводы

1. В последние пять лет возрос интерес российских горнодобывающих предприятий к ЦПТ, основанной на применении автомобильно-конвейерного транспорта, для доставки руды из карьеров. Определенным ограничением ее широкого распространения является значительная капиталоемкость. Поэтому необходимо применение методик, обеспечивающих достоверный расчет окупаемости проекта и оптимизацию его технико-экономических параметров.
2. В Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук разработана достаточно простая и удобная на практике методика обоснования параметров ЦПТ на основе технико-экономической эффективности конструктивных и технологических решений. Она позволяет оценить затраты в сравнении с автомобильным транспортом как в относительных единицах, так и в абсолютных стоимостных показателях (в том числе чистый дисконтированный доход). Имея приемлемую точность расчетов, она отличается охватом широкого диапазона горнотехнических условий и возможностью учета большого количества значимых факторов.
3. В результате исследований установлено, что область наиболее экономичного применения ЦПТ с ленточными конвейерами стандартного уклона

(до 16°) при разnose борта карьера под ДКК по затратам на транспорт ограничивается замкнутой кривой эллипсовидной формы в пределах диапазона технологических параметров: производительность 10–25 млн т/год, высота подъема 250–600 м. Применение специальных схем размещения ДКК с минимальным объемом горно-капитальных работ обеспечивает расширение области эффективного применения ЦПТ.

4. Границы области эффективного применения ЦПТ, установленные на основе абсолютных стоимостных показателей, соответствуют аналогичным ограничениям, определенным по относительным удельным затратам  $([p./т (цпт)]/[p./т (авто)] < 1)$ . Следовательно, предварительный выбор варианта ЦПТ для последующего сравнения, а также укрупненная оценка могут выполняться на основе экспресс-методики, изложенной в [13].
5. Использование разработанной методики позволяет не только выполнить оценку экономического эффекта в широком диапазоне горнотехнических условий, но и оптимизировать развитие транспортной системы во времени, рационально распределить инвестиционную нагрузку и максимизировать итоговый экономический эффект.

*Исследования выполнены в рамках Государственного задания №ГР АААА-А19-119020790025-4.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аброськин А.С. Применение современных систем автоматизации на открытых горных работах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 122–130.
2. Nel S., Kizil M.S., Knights P. Improving truck-shovel matching // Proceedings of the 35th APCOM Symposium / Eds. E.Y. Baafi, R.J. Kinimonth, I. Porter. – Wollongong, NSW, Australia, 24–30 September 2011. – P. 381–391.
3. Bozorgebrahimi E. The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining: Thesis for Doctor Philosophy. – British Columbia, 2004. – 177 p.
4. Burt C.N., Caccetta L. Equipment selection for surface mining. A review // Interfaces. – 2014. – V. 44 (2). – P. 143–162.
5. Radlowski J. In-Pit crushing and Conveying as an alternative to all truck system in open pit mines: Thesis for Master of Applied Science. – British Columbia, 1988. – 286 p.
6. Isaac D., Peter K., Kizil M.S. Truck and shovel versus in-pit conveyors systems: a comparison of the valuable operating time // Coal Operators' Conference. – Wollongong: The University of Wollongong, 2016. – P. 463–476.
7. Оленегорский ГОК запустил дробильный комплекс в карьере с КНК // Официальный сайт Северсталь. URL: [https://olcon.ru/rus/press\\_center/news/document1510.phtml](https://olcon.ru/rus/press_center/news/document1510.phtml) (дата обращения: 04.04.2020).
8. «Металлоинвест» планирует вложить 64 млрд рублей до 2024 года в модернизацию ГОКов. URL: <https://tass.ru/ekonomika/6980305> (дата обращения: 04.04.2020).
9. На Михайловском ГОКе продолжается строительство дробильно-конвейерного комплекса // Железногорские новости: общественно-политическая городская газета. URL: <https://ferumnews.ru/news/ekonomika/mikhailovsky-gok-continues-the-cons/> (дата обращения: 04.04.2020).
10. Инновационные технологии на Михеевском ГОКе // Rusmet: новости. URL: [https://rusmet.ru/innovacionnye\\_tehnologii\\_na\\_mihevskom\\_goke/](https://rusmet.ru/innovacionnye_tehnologii_na_mihevskom_goke/) (дата обращения: 24.03.2020).
11. «МИХЕВСКИЙ ГОК» // Сайт. Русская медная компания. URL: <http://rmk-group.ru/ru/activities/enterprises/mikheevsky/> (дата обращения: 24.03.2020).
12. Семенкин А.В., Антонов В.А. Исследование экономического показателя затрат при циклично-поточной технологии на рудных карьерах // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 1. – С. 103–111. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-1-103-111
13. Журавлев А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 584–602.
14. Новые подходы и решения по применению циклично-поточной технологии на карьерах / А.В. Глебов, В.А. Берсенева, Г.Д. Кармаев, А.В. Семенкин // Горный журнал. – 2017. – № 6. – С. 49–52.
15. Семенкин А.В. Учет фактора времени при определении эффективности применения комплексов ЦПТ // Известия УГ-ГУ. – 2017. – № 1. – С. 72–75.
16. Груздев А.В., Осадчий А.М., Фурин В.О. Стационарные и полустационарные дробильно-перегрузочные установки ОАО «Уралмашзавод» // Горная Промышленность. – 2012. – № 4. – С. 98–100.
17. Argimbaev K.R., Maya B.O. The experience of the introduction of mobile crushing and screening complexes on a deposit of building materials // Research journal of applied science. – 2016. – V. 11. – № 6. – P. 300–303.
18. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21 июня 1999 г. N ВК 477. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200005634> (дата обращения: 13.04.2020).
19. Dos Santos J.A. Sandwich belt high angle conveyors coal mine to prep plant and beyond // Proceedings of the XVIII International Coal Preparation Congress. – Cham: Springer International Publishing, 2016. – P. 111–118.
20. Minkin A., Bötting P., Becker N. Pipe conveying the next stage – a new technology for steep incline high capacity open pit conveying // Bulk Solids Handling. – 2016. – № 2/3. URL: <https://news.bulk-online.com/category/bulk-solids-handling-archive> (дата обращения: 20.04.2020).
21. Glebov A.V., Karmaev G.D., Bersenev V.A. Innovative engineering design of the high-angle conveyor for mining of deep-seated mineral deposits // Aspects in Mining and Mineral

- Science. – 2018. – V. 2. – № 2. – P. 233–239. DOI: 10.31031/AMMS.2018.02.000535
22. Paelke J.W., Ginther R., Kessler F. Преимущества вертикальных конвейерных систем POCKETLIFT и POCKETROPE по сравнению с традиционными системами вертикальной транспортировки сыпучих материалов // Горная промышленность. – 2007. – № 5 (75). – С. 24–29.
23. Paelke J.W., Wilsher M. Flexowell Conveyor Technology // Bulk solids handling. – 1987. – V. 7. – № 2. – P. 2–20.

Поступила 08.09.2020 г.

#### Информация об авторах

**Журавлев А.Г.**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

**Семенкин А.В.**, младший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.



UDC 622.271.3.06:658.527

## EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE CYCLIC-FLOW TECHNOLOGY IN THE MODERN QUARRIES

Artem G. Zhuravlev<sup>1</sup>,  
juravlev@igduran.ru

Aleksandr V. Semenko<sup>1</sup>,  
semenkin@igduran.ru

<sup>1</sup> Institute of Mining of Ural branch of RAS,  
58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russia.

**The relevance** of the research lies in the fact that the use of cyclic flow technology in rational conditions for it allows you to significantly reduce the cost of transporting rock mass, but it has features and limitations, in particular, a large amount of capital expenditures. Therefore, it is necessary to use methods that ensure reliable calculation of the project's payback and optimization of its technical and economic parameters.

**Objective:** based on the analysis of net present value to determine the areas of economical application of cycle-flow technology complexes in comparison with excavator-automobile complexes.

**Objects:** mining factors of complexes of cyclical-flow technology and excavator-automobile complexes (annual productivity, height of lifting of rock mass, type of transported rock mass, technological features of placement of crushing and conveyor complex in the quarry space).

**Methods:** scientific and techno-economic analysis, graphic.

**Results.** The article provides an overview of the use of modern cyclic-flow technology complexes in Russian quarries; shows the results of calculating the economic effect of the complexes compared with the excavator-automobile complexes by the method developed in mining Institute Ural branch Russian Academy of Sciences. The study determined the payback period of additional investment for Stripping complex of cyclic-flow technology with the spacing side of the pit, taking into account the discounting of costs at different process parameters (lift height of rock mass from 180 to 680 m, the annual capacity of the complexes range from 5 to 30 million MT/year). It shows the change in the difference in net present value for the variants of the cyclic-flow technology-excavator-automobile complexes depending on the mining parameters of the complexes. The area of the most economical application of the cyclic-flow technology with belt conveyors of a standard slope (up to 16°) when the side of the quarry is spread under the crushing and conveyor complex at the cost of transport was established.

### Key words:

Cyclic-flow technology, crushing and conveyor complex, technical and economic comparison, application area, belt conveyor.

The study was supported within the framework of State Contract No. 075-00581-19-00, Project No. 0405-2019-0007.

### REFERENCES

1. Abroskin A.S. Use of modern systems of automation of open cast mining. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 122–130. In Rus.
2. Nel S., Kizil M.S., Knights P. Improving truck-shovel matching. *Proc. of the 35<sup>th</sup> APCOM Symposium*. Eds. E.Y. Baafi, R.J. Kinimonth, I. Porter. Wollongong, NSW, Australia, 24–30 September 2011. pp. 381–391.
3. Bozorgebrahimi E. *The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining*. Thesis for Doctor Philosophy. British Columbia, 2004. 177 p.
4. Burt C.N., Caccetta L. Equipment selection for surface mining. A review. *Interfaces*, 2014, vol. 44 (2), pp. 143–162.
5. Radlowski J. *In-pit crushing and conveying as an alternative to all truck system in open pit mines*. Thesis for Master of Applied Science. British Columbia, 1988, 286 p.
6. Isaac D., Peter K., Kizil M.S. Truck and shovel versus in-pit conveyors systems: a comparison of the valuable operating time. *Coal Operators' Conference*. Wollongong, the University of Wollongong Publ., 2016. pp. 463–476.
7. *Olenegorskiy GOK zapustil drobilny kompleks v karere s KNK. Ofitsialny sayt Severstal* [Olenegorsky GOK launched a crushing complex in a quarry with 0020CNC. Official website of Severstal]. Available at: [https://olcon.ru/rus/press\\_center/news/document1510.phtml](https://olcon.ru/rus/press_center/news/document1510.phtml) (accessed 4 April 2020).
8. *«Metalloinvest» planiruet vlozhit 64 mlrd rubley do 2024 goda v modernizatsiyu GOKov* [Metalloinvest plans to invest 64 billion rubles by 2024 in the modernization of GOK]. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/6980305> (accessed 4 April 2020).
9. *Na Mihajlovskom GOKe prodolzhaetsya stroitelstvo drobilno-konveyernogo kompleksa. Zheleznogorskie novosti: obshchestvenno-politicheskaya gorodskaya gazeta* [Construction of a crushing and conveyor complex continues at Mikhailovsky GOK. Zheleznogorsk news: socio-political city newspaper]. Available at: <https://ferumnews.ru/news/ekonomika/mikhailovsky-gok-continues-the-cons/> (accessed 4 April 2020).
10. *Innovatsionnye tekhnologii na Mikheevskom GOKe. Rusmet: novosti* [Innovative technologies at the Mikheevsky GOK. Rusmet: news]. Available at: [https://rusmet.ru/innovatsionnye\\_tekhnologii\\_na\\_miheevskom\\_goke/](https://rusmet.ru/innovatsionnye_tekhnologii_na_miheevskom_goke/) (accessed 24 March 2020).
11. *«MIHEEVSKIY GOK». Sajt. Russkaya mednaya kompaniya* [MIKHEEVSKIY GOK. Website. Russian copper company]. Available at: <http://rmk-group.ru/ru/activities/enterprises/mikheevsky/> (accessed 24 March 2020).
12. Semenko A.V., Antonov V.A. Study of the economic cost indicator for cyclical-flow technology in ore quarries. *University news. Mining journal*, 2019, no. 1, pp. 103–111. In Rus.
13. Zhuravlev A.G. The issues of optimization of parameters of open-cut transport systems. *Mining information and analytical Bulletin*, 2020, no. 3-1, pp. 584–602. In Rus.
14. Glebov A.V., Bersenev V.A., Karmaev G.D., Semenko A.V. New approaches and solutions for the use of cyclic-flow technology in quarries. *Mining journal*, 2017, no. 6, pp. 49–52. In Rus.
15. Semenko A.V. Taking into account the time factor in determining the effectiveness of the use of CFT complexes. *UGGU news*, 2017, no. 1, pp. 72–75. In Rus.
16. Gruzdev A.V., Osadchiy A.M., Furin V.O. Stationary and semi-stationary crushing and reloading plants of «Uralmashzavod». *Mining*, 2012, no. 4, pp. 98–100. In Rus.



17. Argimbaev K.R., Maya B.O. The experience of the introduction of mobile crushing and screening complexes on a deposit of building materials. *Research journal of applied science*, 2016, vol. 11, no. 6, pp. 300–303.
18. *Metodicheskie rekomendacii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov: utv. Minekonomiki RF, Minfinom RF i Gosstroem RF ot 21 iyunya 1999 g. N VK 477* [Methodological recommendations for evaluating the effectiveness of investment projects: approved. Ministry of economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance and Gosstroy of the Russian Federation from June 21 1999 N VK 477]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200005634> (accessed 13 April 2020).
19. Dos Santos J.A. Sandwich belt high angle conveyors coal mine to prep plant and beyond. *Proc. of the XVIII International Coal Preparation Congress*. Cham, Springer International Publishing, 2016. pp. 111–118.
20. Minkin A., Bötsting P., Becker N. Pipe conveying the next stage – a new technology for steep incline high capacity open pit conveying. *Bulk Solids Handling*, 2016, no. 2/3. Available at: <https://news.bulk-online.com/category/bulk-solids-handling-archive> (accessed 20 April 2020).
21. Glebov A.V., Karmaev G.D., Bersenev V.A. Innovative engineering design of the high-angle conveyor for mining of deep-seated mineral deposits. *Aspects in Mining and Mineral Science*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 233–239.
22. Paelke J.W., Ginther R., Kessler F. Advantages of vertical conveyor systems POCKETLIFT and POCKETROPE compared to traditional systems of vertical transportation of bulk materials. *Mining*, 2007, no. 5 (35), pp. 24–29. In Rus.
23. Paelke J.W., Wilsher M. Flexowell Conveyor Technology. *Bulk solids handling*, 1987, vol. 7, no. 2, pp. 2–20.

Received: 8 September 2020.

#### Information about the authors

**Artem G. Zhuravlev**, Cand. Sc., assistant professor, laboratory chief, Institute of Mining of Ural branch of RAS.  
**Aleksandr V. Semenkin**, junior researcher, Institute of Mining of Ural branch of RAS.

УДК 622.276.43-027.236

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАВОДНЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

Полякова Наталия Игоревна<sup>1</sup>,  
natashap96@mail.ru

Максимова Юлия Анатольевна<sup>1</sup>,  
maximovayulia@yandex.ru

Зятиков Павел Николаевич<sup>1</sup>,  
zpavel@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью обобщения накопленного опыта и информации по применению общепринятых методов анализа эффективности системы поддержания пластового давления, выявления достоинств и недостатков каждого отдельного метода и формирования рекомендаций по упрощению процесса проведения анализа эффективности при одновременном увеличении глубины и качества анализа, в перспективе обеспечивающих сокращение потерь добычи нефти.

**Целью** исследования является формирование рекомендаций по совершенствованию процесса анализа эффективности системы заводнения нефтяных пластов на месторождениях, находящихся на поздних стадиях разработки.

**Объект:** южная лицензионная территория Приобского месторождения (Ханты-Мансийский автономный округ).

**Методы:** сравнительный анализ существующих методов оценки эффективности систем заводнения нефтяных пластов, выявление достоинств и недостатков, формирование комплексного подхода к применению методов анализа эффективности системы заводнения, оценка перспективности применения результатов исследования.

**Результаты.** Рассмотрена методика оптимизации процесса анализа эффективности системы заводнения нефтяных месторождений путём разделения их на более мелкие гидродинамически замкнутые участки пласта – блоки (ячейки заводнения). Для повышения качества проводимого анализа предложен переход от реактивного подхода диагностики потерь к проактивному подходу, позволяющему предсказать и предотвратить снижение добычи нефти. На основании тенденции к укрупнению участков пласта, подлежащих анализу, по сравнению с традиционными методами анализа, и внедрения проактивного подхода предложен алгоритм повышения эффективности управления базовой добычей – проактивный блочно-факторный анализ. Рассмотрена перспективность применения результатов блочно-факторного анализа на примере одного из блоков Приобского месторождения (Ханты-Мансийский автономный округ). Возможно применение представленного алгоритма анализа для схожих геолого-физических условий других пластов с целью адаптации данной технологии на территории других месторождений.

### Ключевые слова:

Месторождение, разработка, нефтеотдача, коэффициент извлечения нефти, заводнение, эффективность, анализ системы заводнения, блочно-факторный анализ, проактивный анализ.

### Введение

Первые упоминания в литературе о закачке воды в нефтяной пласт в целях увеличения их нефтеотдачи и оценке эффективности данного мероприятия относятся к концу XIX в. В 1921 г. в США документально было зафиксировано разрешение нагнетания воды в пласт с целью повышения коэффициента извлечения нефти (КИН), а в 40-х гг. заводнение получило широкое применение и на месторождениях СССР.

Начиная с того времени данной теме было посвящено множество исследований. Особенно большой вклад в исследование совершенствования методов управления разработкой нефтяных месторождений с применением заводнения внесли Р.Х. Муслимов, М.Л. Сургучёв [1–4]. В последние годы наметилась устойчивая тенденция к комплексному подходу к анализу реализуемой системы заводнения и её совершенствованию, большое внимание которой уделяется в работах А.А. Анкудинова и Л.А. Ваганова [5–10].

Однако не вся закачиваемая в пласт вода совершает полезную работу. Вследствие нарушений целостности цементного камня и колонны, неоднородности

пластов, внутрипластовых перетоков происходят потери воды. Таким образом, появляется необходимость разделять понятия эффективной и неэффективной закачки, учитывая, что в конечном итоге целью заводнения является вытеснение нефти водой из пластов и поддержание при этом пластового давления на заданном уровне. Следовательно, эффективная закачка – это та закачка, которая направлена на увеличение коэффициента охвата пласта воздействием.

Одним из ключевых показателей эффективности системы заводнения и эффективности разработки является компенсация добычи закачкой – отношение закаченного объёма воды к общему объёму добытой жидкости (нефти и воды) [11]:

$$\text{Компенсация} = \frac{Q_{\text{закач}} B_w}{Q_{\text{нефти}} B_o + Q_{\text{воды}} B_w}.$$

где  $Q_{\text{закач}}$  – объём закачанной в пласт воды, м<sup>3</sup>;  $B_w$  – объёмный коэффициент воды, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{нефти}}$  – объём добытой нефти, м<sup>3</sup>;  $B_o$  – объёмный коэффициент нефти при начальном и среднем пластовом давлении, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{воды}}$  – объём добытой воды, м<sup>3</sup>.

Существует два вида компенсации:

- Накопленная – отношение накопленного за весь период разработки объёма воды к общему объёму добытой жидкости:

$$\text{Компенсация (накопл)} = \frac{Q_{\text{закач.накопл}} B_w}{Q_{\text{нефти.накопл}} B_o + Q_{\text{воды.накопл}} B_w},$$

где  $Q_{\text{закач.накопл}}$  – объём накопленной за весь период разработки закачанной в пласт воды,  $\text{м}^3$ ;  $B_w$  – объёмный коэффициент воды,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $Q_{\text{нефти.накопл}}$  – накопленный объём добытой нефти,  $\text{м}^3$ ;  $B_o$  – объёмный коэффициент нефти при начальном и среднем пластовом давлении,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $Q_{\text{воды.накопл}}$  – накопленный объём добытой воды,  $\text{м}^3$ .

- Текущая (годовая, месячная) – отношение текущего (годового, месячного) объёма воды к текущему (годовому, месячному) объёму добытой жидкости:

$$\text{Компенсация (тек)} = \frac{Q_{\text{закач.тек}} B_w}{Q_{\text{нефти.тек}} B_o + Q_{\text{воды.тек}} B_w},$$

где  $Q_{\text{закач.тек}}$  – объём закачанной в пласт воды за фиксированный период времени (текущий),  $\text{м}^3$ ;  $B_w$  – объёмный коэффициент воды,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $Q_{\text{нефти.тек}}$  – текущий объём добытой нефти,  $\text{м}^3$ ;  $B_o$  – объёмный коэффициент

нефти при начальном и среднем пластовом давлении,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $Q_{\text{воды.тек}}$  – текущий объём добытой воды,  $\text{м}^3$ .

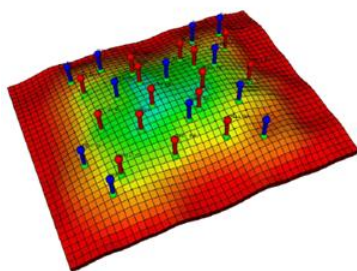
В идеале объёмы отобранной и закачанной жидкости должны совпадать, но вследствие влияния геолого-физических и технологических факторов происходят явления недокомпенсации и перекомпенсации. Перекомпенсация отборов (объёмы закачки больше объёмов добычи) приводит к раннему обводнению и снижению нефтеотдачи, а недокомпенсация (объёмы закачки меньше объёмов добычи) – к снижению пластового давления и, как следствие, потерям добычи нефти.

Своевременное определение проблемных участков обеспечивает эффективную эксплуатацию системы заводнения посредством назначения соответствующих мероприятий на добывающих и нагнетательных скважинах.

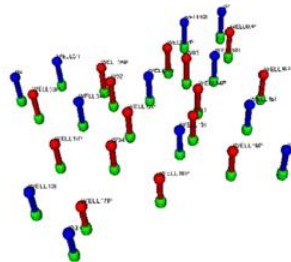
#### Уровни анализа эффективности заводнения

Одним из главных вопросов, решаемых при проведении анализа эффективности заводнения, является выбор масштаба (определение размеров участка залежи, подлежащей анализу). В зависимости от необходимой детализации показатели эффективности заводнения можно определять для всего месторождения в целом, а можно для каждой скважины отдельно (рис. 1).

#### Анализ месторождения



#### Анализ скважин



#### Анализ блоков

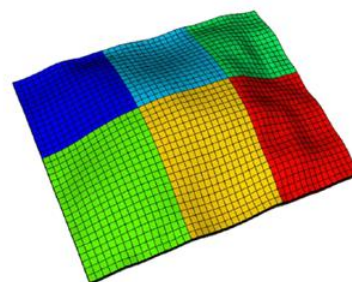


Рис. 1. Уровни анализа эффективности заводнения

Fig. 1. Waterflood efficiency analysis levels

При этом необходимо учитывать, что месторождение в целом характеризуется очень большим количеством параметров, изменяющихся по площади, даже детальной проработки которых будет недостаточно для корректного выделения проблемных зон и составления программ мероприятий, необходимых для повышения нефтеотдачи пластов [12].

Поскважинный анализ позволяет принять обоснованное решение по каждой скважине, но при этом совсем не учитывается гидродинамическая связь и влияние соседних скважин. Помимо этого, процесс такого анализа будет крайне трудозатратным и займёт очень много времени, что повлечёт за собой большие экономические потери.

Ускорить и упростить процедуру анализа эффективности заводнения нефтяных пластов, и при этом обеспечить своевременное реагирование и принятие решений при сохранении качества и глубины анализа, позволит разделение объекта разработки на более мелкие участки пласта – блоки (элементы заводнения)

[13]. Блочный анализ позволяет выявлять ячейки с существенным отклонением контрольных параметров от плановых значений, анализ причин данного отклонения и их последующее устранение путём проведения геолого-технических мероприятий (ГТМ).

Границы блока должны проходить через нагнетательные скважины, при этом к основным рекомендациям при разделении залежи на участки относятся: выделение гидродинамически замкнутых систем и поиск таких районов залежи, которые легко дифференцируются по геологическим или фильтрационным характеристикам [14].

Лучше всего проводить деление на блоки по результатам трассерных исследований. Для терригенных коллекторов достаточно информации о гидродинамической связи нагнетательных и реагирующих добывающих скважин и распределении фильтрационных потоков в пласте, для карбонатных, помимо этого, также необходимо учитывать геометрию и виды разломов [15, 16].

Для нагнетательных скважин, расположенных на границах блоков, необходимо производить площадное разделение закачки. Для этого вводится специальный показатель – коэффициент участия (КУ) скважин, определяющий долю закачки скважины в общем объеме закачки определенного блока [17].

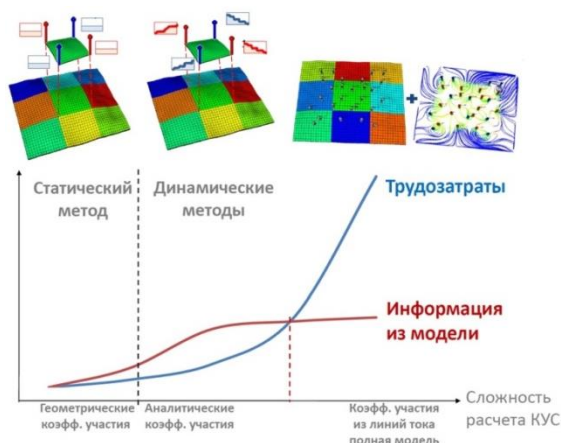


Рис. 2. Виды коэффициентов участия скважин

Fig. 2. Types of well participation rates

Если режимы работы скважин не учитываются, то применяются статические КУ, расчёт которых основан на геометрическом подходе. При данном подходе вклад граничной скважины в каждый блок пропорционален углу, открытому для потока в этот блок. Если происходит учёт изменения режимов работы скважин, то применяются динамические КУ, рассчитываемые аналитическим способом или моделируемые на осно-

вании линий тока [18]. В данном случае вклад граничной скважины в каждый блок пропорционален закачке данного блока (рис. 2).

С увеличением отношения между закачкой соседних блоков растёт отличие динамических коэффициентов участия скважин от статических.

#### Особенности реализации реактивного блочно-факторного анализа

Целью блочного анализа является оперативное регулирование процесса заводнения, направленное на замедление темпов падения базовой добычи нефти вследствие недокомпенсации отборов закачкой, поддержание пластового давления на заданном уровне, сокращение непроизводительной закачки воды.

Для применения реактивного блочно-факторного анализа (БФА) проводится сбор необходимой информации о режиме эксплуатации каждого блока, выявление проблемных ячеек с потерями добычи нефти, выбор ГТМ в зависимости от типа потерь [19].

Факторный анализ заключается в ранжировании потерь нефти на потери вследствие снижения объёмов добычи жидкости, потери, обусловленные ростом обводнённости добываемой продукции, и потери вследствие сокращения среднего действующего фонда (СДФ) скважин (рис. 3).

Потери нефти по жидкости согласно расчетным значениям пластового давления (по материальному балансу) разделяются на потери по пластовому давлению, потери по забойному давлению и другие.

Потери нефти по обводнённости разделяются на потери по естественному и опережающему обводнению.

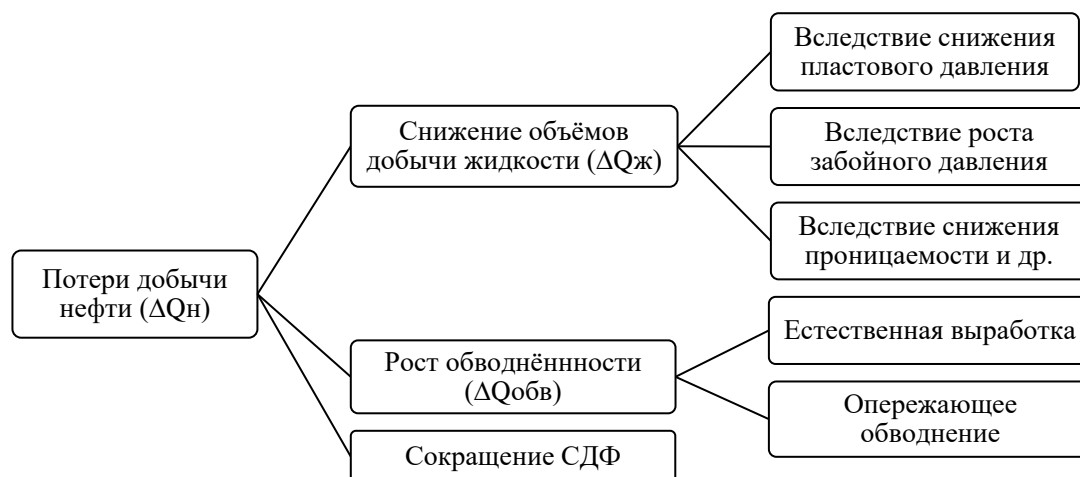


Рис. 3. Факторное разделение потерь добычи нефти

Fig. 3. Factorial separation of oil losses

#### Методология проактивного блочного анализа

Большая часть месторождений Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна вступили в заключительные стадии разработки, для которых характерны снижение темпов добычи и рост процента обводнённости добываемого флюида. В связи с этим недостаточно только реагировать на уже произошедшее событие, повлекшее снижение добычи нефти. Данная

проблема освещалась в работах [20–22], однако в них отсутствуют результаты, на основании которых можно было бы спрогнозировать поведение модели месторождения, используя промысловые данные. Таким образом, необходимо внедрение проактивного подхода, обеспечивающего переход от диагностики причин потерь добычи нефти к анализу и управлению добычей (рис. 4) [11].

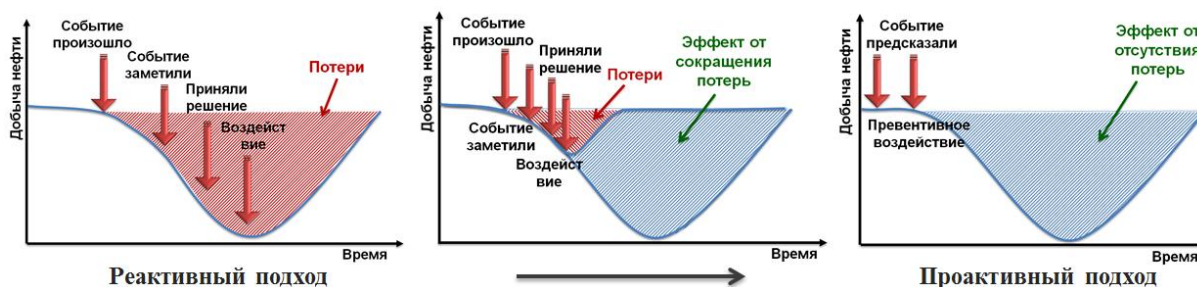


Рис. 4. Сокращение потерь за счёт перехода от реактивного подхода к проактивному

Fig. 4. Reduction of losses due to the transition from a reactive to a proactive approach

Знание геолого-физических параметров залежи и особенностей изменения показателей разработки месторождения позволяет сделать блочно-факторный анализ проактивным, т. е. действовать заранее, моделируя ситуацию, и формировать связанные с ней решения и реакции заблаговременно, а не реагировать на уже произошедшее событие. Таким образом, в основе проактивного физически-содержательного анализа данных лежат [23]:

1. Модель материального баланса.

$$N_p B_o^i = N B_o^{(i-1)} \Delta p_c + W_e + (W_{inj} - W_p) B_w,$$

где  $N_p$  – накопленная добыча нефти, м<sup>3</sup>;  $B_o^i$ ,  $B_w$  – текущий объемный коэффициент соответственно нефти и воды, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $N$  – балансовые запасы нефти, м<sup>3</sup>;  $B_o^{i-1}$  – объемный коэффициент нефти на предыдущем шаге, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\Delta p$  – изменение пластового давления относительно предыдущего, МПа;  $c_e$  – эффективная сжимаемость системы, МПа<sup>-1</sup>;  $W_e$  – приток воды из-за контура, м<sup>3</sup>;  $W_{inj}$ ,  $W_p$  – накопленная соответственно закачка и добыча воды, м<sup>3</sup>.

2. Адаптированные на историю разработки характеристики вытеснения по блокам – модель вытеснения в слоисто-неоднородном пласте.

$$K_{orf}^m = K_v \left[ 0,5 - 0,5 \operatorname{erf} \frac{\sigma}{\sqrt{2}} + \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{1 - \frac{F_{wo}}{m}}{1 + \frac{F_{wo}}{m}} \right) + \frac{\tau}{1 + F_{wo}} \right],$$

адаптируемые параметры – коэффициент вытеснения, коэффициент Дикстры-Парсонса, соотношение подвижностей, текущая и стартовая обводненность.

3. Расчетные целевые значения компенсации и закачки по блокам.

4. Детализированный факторный анализ изменения добычи нефти.

Для того, чтобы спрогнозировать дебит жидкости, необходимо учитывать время задержки отклика на изменение режима закачки, которое рассчитывается по формуле на основании значения пьезопроводности пласта и среднего расстояния в элементе заводнения между эксплуатационными и нагнетательными скважинами:

$$\Delta t = \frac{\left( \frac{L}{0,038} \right)^2 \varphi \mu c_t}{k},$$

где  $L$  – среднее расстояние в элементе заводнения между добывающими и нагнетательными скважинами, м;  $\varphi$  – пористость, доли ед.;  $\mu$  – вязкость, Па·с;  $c_t$  – общая сжимаемость системы, Па<sup>-1</sup>;  $k$  – проницаемость пласта, м<sup>2</sup>.

Учитывая всё вышесказанное, последовательность проведения проактивного блочного анализа выглядит следующим образом (рис. 5).

Прогноз добычи жидкости и пластового давления выполняется путем совместного решения уравнений материального баланса, фильтрации и PVT-корреляций. При прогнозе считаются суммарные потери жидкости и нефти, текущее пластовое давление, изменение пластового давления, рекомендации по увеличению приёмистости по блоку в целом для сохранения текущего энергетического состояния залежи и целевая компенсация.

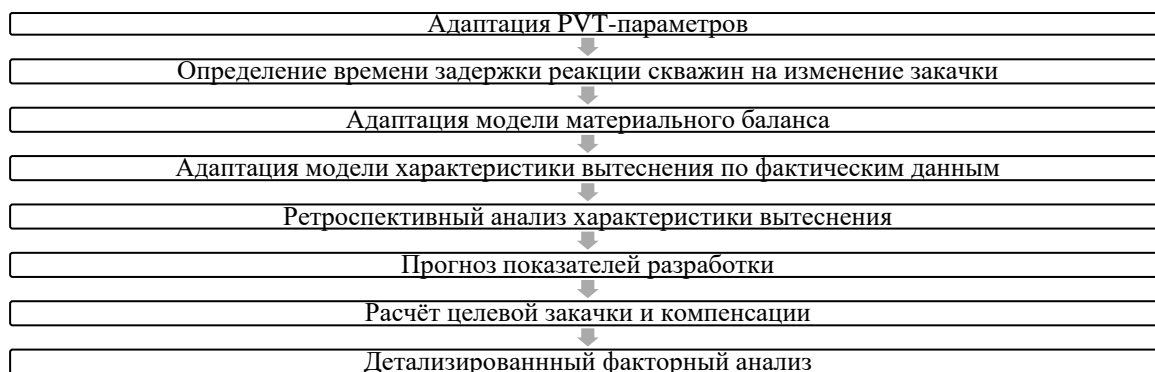


Рис. 5. Последовательность проведения проактивного блочного анализа

Fig. 5. Sequence of proactive block analysis



### Перспективность применения результатов проактивного блочного анализа

На рис. 6 представлен пример определения потерь добычи нефти вследствие снижения пластового давления. Целевая компенсация для данной скважины составляет 158 %, а значение текущей компенсации составляет 142 %. В результате можно сделать вывод о недостаточной компенсации отборов закачкой, при этом если не увеличить данный показатель, пластовое давление продолжит снижаться (на рис. 6 прогнозируемое поведение пластового давления представлено красным цветом).



Рис. 6. Динамика пластового давления по результатам проактивного блочного анализа для элемента заводнения Приобского месторождения (Южная лицензионная территория)

Fig. 6. Dynamics of reservoir pressure according to the results of proactive block analysis for the water-flooding element of the Priobskoe field (Southern license territory)

Фактический прирост добычи нефти по данному элементу заводнения за восемь месяцев за счёт увеличения объёмов добычи жидкости составил 578 т. Известно, что на двух добывающих скважинах, входящих в данный блок, были проведены ГТМ по снижению забойного давления, которые и обеспечили прирост добычи нефти.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муслимов Р.Х. Современные методы управления разработкой нефтяных месторождений с применением заводнения. – Казань: Изд-во Казанского университета, 2003. – 596 с.
2. Совершенствование систем разработки залежей нефти в трещиноватых карбонатных коллекторах / Р.Х. Муслимов, Э.И. Сулейманов, Р.Г. Абдулмизитов, Р.Т. Фазлыев, Г.С. Абдулмизитов // Научно-технический журнал «Нефтяное хозяйство». – 1996. – № 10. – С. 25–28.
3. Сургучев М.Л., Желтов Ю.В., Симкин Э.М. Физико-химические микропроцессы в нефтегазоносных пластах. – М.: Недра, 1984. – 215 с.
4. Сургучев М.Л., Симкин Э.М. Факторы, влияющие на состояние остаточной нефти в заводненных пластах // Научно-технический журнал «Нефтяное хозяйство». – 1988. – № 9. – С. 31–36.
5. Анкудинов А.А. Методика анализа эффективности систем заводнения путем оценки распределения закачки // Сборник материалов конференций. XII конференция молодых специалистов, работающих в организациях, осуществляющих деятельность, связанную с использованием участков недр на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югры. – Ханты-Мансийск, 2012. – С. 87–91.

Однако результаты прогноза по потерям добычи нефти говорят о существующем снижении пластового давления примерно на 0,7 МПа за восемь месяцев, а прогноз данного показателя свидетельствует о сохранении негативного тренда на дальнейшее снижение пластового давления на 0,3 МПа за последующие три месяца. Потери в таком случае составят 108 т нефти. По результатам проактивного блочно-факторного анализа даны рекомендации по увеличению закачки до целевого уровня.

По результатам проактивного блочно-факторного анализа выявлен негативный характер изменения обводнённости. Оперативная диагностика и проведение мероприятий по выравниванию профилей приемистости в группе скважин позволят снизить темп роста обводнённости, что даст возможность предотвратить большую часть потерь нефти.

### Заключение

Основными стратегическими задачами большинства нефтедобывающих предприятий в настоящее время является оптимизация реализуемой системы разработки, увеличение темпов отбора остаточных извлекаемых запасов, достижение максимального коэффициента извлечения нефти при минимальном возможном накопленном водонефтяном факторе, сокращение объёмов непроизводительной закачки.

Все эти задачи решаются посредством внедрения проактивного блочно-факторного анализа эффективности системы заводнения нефтяных пластов. Данный подход позволяет упростить и ускорить процесс анализа, изменить динамику обводнения добываемой продукции, предотвратить потери добычи нефти из-за снижения пластового давления, повысить энергоэффективность, вследствие повышения эффективности закачки воды в нефтяные пласты.

Возможно применение представленного алгоритма анализа для схожих геолого-физических условий других пластов с целью адаптации данной технологии на территории других месторождений.

6. Анкудинов А.А., Ваганов Л.А. Совершенствование разработки нефтяных месторождений на основе многофакторного анализа эффективности системы заводнения // Сборник материалов форума «НефтьГазТЭК». Тюменский международный инновационный форум. – Тюмень, 2013. – С. 35–38.
7. Анкудинов А.А., Ваганов Л.А. Методика распределения объёмов закачиваемой воды по площади нефтяного месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – М.: ВНИИОЭНГ, 2013. – С. 19–24.
8. Анкудинов А.А., Ваганов Л.А. Распределение объёмов закачки нагнетательных скважин с учетом влияющих факторов // Известия высших учебных заведений. – 2013. – № 5. – С. 50–54.
9. Анкудинов А.А., Ваганов Л.А., Сохошко С.К. Комплексный подход к анализу реализуемой системы заводнения и ее совершенствованию // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 8. – С. 48–51.
10. Анкудинов А.А., Ваганов Л.А. Анализ эффективности системы заводнения с применением метода материального баланса // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 10. – С. 63–66.
11. Wolkott D. Applied waterflood field development. – Houston: Publ. of Schlumberger, 2001. – 144 p.
12. Oil reservoir waterflooding efficiency evaluation method / A. Suleymanov, A. Abbasov, D. Guseynova, J. Babayev // Article

- in Petroleum Science and Technology. – 2016. – № 34 (16). – P. 1447–1451.
13. Thiele M.R., Batycky R.P., Fenwick D.H. Streamline simulation for modern reservoir-engineering workflows // Society of Petroleum Engineers. – 2010. – № 1. – P. 64–70.
14. Арсеньевский И.С. Автоматическое построение блоков в управлении внутриконтурным заводнением месторождения нефти на основе иерархического анализа // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 8. – С. 10–17.
15. Фомкин А.В. Проблемы и перспективы освоения нефтяных месторождений со сложно построенными карбонатными объектами и залежами фундамента // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 1. – С. 6–12.
16. Алексеева К.О., Байков В.А. Разработка трещиновато-пористых коллекторов с помощью разгазирования нефти: влияние типа смачиваемости породы, размера и формы матричных блоков на коэффициент извлечения нефти // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 12. – С. 35–40.
17. Brady P., Krumhansl J. Surface complexation modeling for waterflooding of sandstones // Society of Petroleum Engineers. – 2013. – № 4. – P. 214–218.
18. Streamlines for the target injection calculation in complex field conditions / A. Gladkov, D. Kondakov, R. Gareev, M. Belyanushkina, A. Lvov, I. Arsenevsky // SPE 166874-MS. – 2013. DOI: 10.2118/166874-MS.
19. Геолого-технологический скрининг методов воздействия на пласты / С.А. Яскин, В.В. Мухаметшин, В.Е. Андреев, Г.С. Дубинский, А.П. Чижов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 2. – С. 51–56.
20. Rezapour A., Ortega A., Ershaghi I. Reservoir waterflooding system identification and model validation with injection/production rate fluctuations // SPE 174052-MS. – 2015. DOI: 10.2118/174052-MS.
21. El-Khatib N.A. Waterflooding performance in inclined communicating stratified reservoirs // SPE 126344-MS. – 2010. DOI: 10.2118/126344-MS.
22. Cao F., Luo H., Lake L.W. Development of a fully coupled two-phase flow based Capacitance Resistance Model (CRM) // Society of Petroleum Engineers. – 2014. – April 12. – DOI: 10.2118/169485-MS.
23. Проактивный блочный анализ разработки месторождений / А.Н. Ситников, А.А. Пустовских, А.Ю. Шеремеев, А.С. Маргарит, А.В. Ахметов, Д.Ю. Колупаев, Д.А. Ищук, М.А. Шакиров // ПРОНефть. – 2016. – № 1. – С. 60–67.

Поступила 17.06.2020 г.

#### Информация об авторах

**Полякова Н.И.**, магистрант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Максимова Ю.А.**, старший преподаватель отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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



UDC 622.276.43-027.236

## INTEGRATED APPROACH TO APPLICATION OF METHODS FOR ANALYZING THE EFFECTIVENESS OF THE OIL RESERVOIR FLOODING SYSTEM

Natalia I. Polyakova<sup>1</sup>,  
natashap96@mail.ru

Yulia A. Maksimova<sup>1</sup>,  
maximovayulia@yandex.ru

Pavel N. Zyatikov<sup>1</sup>,  
zpavel@tpu.ru

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

**The relevance** of the study is caused by the need to summarize the accumulated experience and information on application of generally accepted methods for analyzing the effectiveness of the pressure maintenance system, identifying the advantages and disadvantages of each individual method, and formulating recommendations to simplify the efficiency analysis, while increasing the depth and quality of the analysis, which in the future will reduce production losses oil.

**The research aim** is to formulate recommendations for improving the process of analyzing the effectiveness of the oil flooding system.

**The research subject:** southern licensed territory of the Priobskoe field (Khanty-Mansi Autonomous Okrug).

**The research methods:** correlation analysis of existing methods of evaluation of water-flooding oil reservoirs, identification of strengths and weaknesses, development of an integrated approach to the use of methods of analysis of effectiveness of waterflood, and assessment of prospects of application of research results.

**The research results.** The paper discusses a methodology for optimizing the process of analyzing the effectiveness of a waterflooding system for oil fields by dividing them into smaller hydrodynamically closed sections of the reservoir – blocks (waterflood cells). To prevent loss of quality of the analysis, a transition from a reactive approach to diagnosing losses to a proactive one is proposed, which allows predicting and preventing a decrease in oil production. Based on the tendency to enlarge the sections of the reservoir to be analyzed, in comparison with traditional methods of analysis, and implement a proactive approach, an algorithm is proposed to increase the efficiency of base production management – proactive block factor analysis. The prospects of applying the results of block-factor analysis on the example of one of the blocks of the Priobskoe field (Khanty-Mansi Autonomous Area) is considered. It is possible to adapt the presented analysis algorithm to the necessary geological and physical conditions of other layers in order to adapt this technology in other oil and gas provinces.

### Key words:

Oilfield, development, oil recovery, oil recovery coefficient, waterflooding, efficiency, analysis of the waterflooding system, block factor analysis, proactive analysis.

### REFERENCES

1. Muslimov R.Kh. *Sovremennye metody upravleniya razrabotkoy neftyanykh mestorozhdeniy s primeneniem zavodneniya* [Modern methods of management of oil field development using flooding]. Kazan, Kazan University Publ. house, 2003. 596 p.
2. Muslimov R.Kh., Suleymanov E.I., Abdulmazitov R.G., Fazlyev R.T., Abdulmazitov G.S. *Sovershenstvovanie sistem razrabotki zalezhey nefiti v treshchinovatykh karbonatnykh kolektorakh* [Improving systems for developing oil deposits in fractured carbonate reservoirs]. *Oil economy*, 1996, no. 10, pp. 25–28.
3. Surguchev M.L., Zheltov Yu.V., Simkin E.M. *Fiziko-khimicheskie mikroprotsessy v neftegazonnykh plastakh* [Physical and chemical micro-processes in oil and gas reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 215 p.
4. Surguchev M.L., Simkin E.M. *Faktory, vliyayushchie na sostoyanie ostatochnoy nefiti v zavodnennykh plastakh* [Factors affecting the state of residual oil in waterlogged reservoirs]. *Oil economy*, 1988, no. 9, pp. 31–36.
5. Ankudinov A.A. *Metodika analiza effektivnosti sistem zavodneniya putem otsenki raspredeleniya zakachki* [Methodology for analyzing the effectiveness of flooding systems by evaluating the distribution of injection]. *Sbornik materialov konferentsy. XII konferentsiya molodykh spetsialistov, rabotayushchikh v organizatsiyakh, osushchestvlyayushchikh deyatel'nost', svyazannuyu s ispol'zovaniem uchastkov nedr na territorii Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga–Yugry* [Collection of conference materials, XII conference of young professionals working in organizations engaged in activities related to the use of subsurface areas in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug–ugra]. Khanty-Mansiysk, 2012. pp. 87–91.
6. Ankudinov A.A., Vaganov L.A. *Sovershenstvovanie razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy na osnove mnogofaktornogo analiza effektivnosti sistemy zavodneniya* [Improving the development of oil fields on the basis of multi-factor analysis of the effectiveness of the flooding system]. *Sbornik materialov foruma «NeftGaz-TEK». Tyumenskiy mezhdunarodnyy innovatsionnyy forum* [Collection of materials of the forum «Neftgaztek». Tyumen international innovation forum]. Tyumen, 2013. pp. 35–38.
7. Ankudinov A.A., Vaganov L.A. *Metodika raspredeleniya obemov zakachivaemoy vody po ploshchadi neftyanogo mestorozhdeniya* [Method of distribution of volumes of pumped water over the area of an oil field]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Geology, Geophysics and development of oil and gas fields]. Moscow, VNIIOENG, 2013. pp. 19–24.
8. Ankudinov A.A., Vaganov L.A. *Method of distribution of pumped water over the entire area of an oil deposit with determination of influencing factors. Problems of increasing the efficiency of oil field development at a late stage*, 2013, no. 5, pp. 165–168.
9. Ankudinov A.A., Vaganov L.A., Sohoshko S.K. *A comprehensive approach to the analysis of realizing flooding system and its improvement. Neftyanoe hozyaystvo*, 2016, no. 8, pp. 48–51.
10. Ankudinov A.A., Vaganov L.A. *Analiz effektivnosti sistemy zavodneniya s primeneniem metoda materialnogo balansa* [Analysis of the efficiency of the plant system using the material balance method]. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, 2014, no. 10, pp. 63–66.
11. Wolkott D. *Applied waterflood field development*. Houston, Publ. of Schlumberger, 2001. 144 p.

12. Suleymanov A., Abbasov A., Guseynova D., Babayev J. Oil reservoir waterflooding efficiency evaluation method. *Article in Petroleum Science and Technology*, 2016, no. 34 (16), pp. 1447–1451.
13. Thiele M.R., Batycky R.P., Fenwick D.H. Streamline simulation for modern reservoir-engineering workflows. *Society of Petroleum Engineers*, 2010, no. 1, pp. 64–70.
14. Arsenevsky I.S. Avtomaticheskoe postroenie blokov v upravlenii vnutrikonturnym zavodneniem mestorozhdeniya nefti na osnove ierarkhicheskogo analiza [Automatic construction of blocks in the management of intra-circuit flooding of the oil field on the basis of hierarchical analysis]. *Automation, telemekhanization and communication in the oil industry*, 2017, no. 8, pp. 10–17.
15. Fomkin A.V. Problemy i perspektivy osvoeniya neftyanykh mestorozhdeniy so slozhno postroennymi karbonatnymi obektami i zalezhami fundamenta [Problems and prospects of development of oil fields with complex constructed carbonate objects and Foundation deposits]. *Oilfield business*, 2017, no. 1, pp. 6–12.
16. Alekseeva K.O., Baykov V.A. Development of fractured-porous reservoirs using oil degassing: influence of rock wettability type, size and shape of matrix blocks on oil recovery coefficient. *Automation, telemekhanization and communication in the oil industry*, 2017, no. 12, pp. 35–40.
17. Brady P., Krumhansl J. Surface complexation modeling for waterflooding of sandstones. *Society of Petroleum Engineers*, 2013, no. 4, pp. 214–218.
18. Gladkov A., Kondakov D., Gareev R., Belyanushkina M. Streamlines for the target injection calculation in complex field conditions. *SPE 166874-MS*, 2013. DOI: 10.2118/166874-MS.
19. Yaskin S.A., Mukhametshin V.V., Andreev V.E., Dubinsky G.S., Chizhov A.P. Geological and technological screening of impact methods on reservoirs. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, 2018, no. 2, pp. 51–56.
20. Rezapour A., Ortega A., Raghi I. Reservoir waterflooding system identification and model validation with injection/production rate fluctuations. *SPE 174052-MS*, 2015. DOI: 10.2118/174052-MS.
21. El-Khatib N.A. Waterflooding performance in inclined communicating stratified reservoirs. *SPE 126344-MS*, 2010. DOI: 10.2118/126344-MS.
22. Cao F., Luo H., Lake L.W. Development of a fully coupled two-phase flow based capacitance resistance model (CRM). *SPE 169485-MS*, 2014. DOI: 10.2118/169485-MS.
23. Sitnikov A.N., Pustovskikh A.A., Ereemeev A.Yu., Margarit A.S., Akhmetov V.A., Kolupaev D.Y., Ishchuk D.A., Shakirov M.A. Proactive block analysis of field development. *«PRONefti» Magazine*, 2016, no. 1, pp. 60–67.

Received: 17 June 2020.

#### Information about the authors

**Natalia I. Polyakova**, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Yulia A. Maksimova**, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

УДК 622.276.66

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОТОКООТКЛОНЯЮЩИХ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ ШАРОВ BIOBALLS ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МНОГОСТАДИЙНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Терпинская Виктория Вячеславовна<sup>1</sup>,  
vvt26@tpu.ru

Абрамов Павел Алексеевич<sup>2</sup>,  
neon\_5.94@mail.ru

Карпова Евгения Геннадьевна<sup>1</sup>,  
karpovaeg@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью оптимизации процесса проведения многостадийного гидроразрыва пласта, которая позволит обеспечить соответствие параметров законченных с многостадийным гидроразрывом пласта скважин их ожидаемым параметрам путем селективного изолирования пропластков для проведения селективного гидроразрыва пласта каждой зоны скважины. Это позволит недропользователям повысить рентабельность проведения процедуры, а также увеличить суточный дебит скважин, что также приведет к положительному экономическому эффекту.

**Цель:** проанализировать результаты технологии и пример применения потокоотклоняющих шаров BioBalls в скважине № 9101 Шаимского месторождения, выделить преимущества данного метода для проведения многостадийного гидроразрыва пласта.

**Объекты:** перфорационные потокоотклоняющие герметизирующие шары BioBalls и их эффективность для изолирования перфорационных отверстий.

**Методы:** определение профилей приемистости целевых интервалов, сравнение горного давления продуктивных пластов для определения точки инициации разрыва, анализ параметров эффективности многостадийного гидроразрыва пласта для установления соответствия проектным данным, сравнение параметров работы скважины № 9101 до и после проведения гидроразрыва для установления эффективности проводимой процедуры, наблюдение за работой скважины для определения режимов работы спустя три месяца после проведения процедуры.

**Результаты.** Дана характеристика шаров BioBalls; представлена геолого-физическая характеристика объектов изоляции; определен профиль приемистости целевых интервалов под закачкой; получено соответствие эффективности процедуры многостадийного гидроразрыва пласта с проектными параметрами; определено время проведения процедуры гидроразрыва; получены результаты проведения процедуры гидроразрыва с применением потокоотклоняющих шаров BioBalls, которые свидетельствуют об эффективности применения метода в данных условиях, а именно перевод скважины № 9101 в действующий фонд, увеличение дебитов по нефти и уменьшение обводненности.

### Ключевые слова:

Скважина, продуктивный пласт, многостадийный гидроразрыв пласта, потокоотклоняющие шары, Bioballs.

### Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одним из способов интенсификации работы нефтяных и газовых скважин. ГРП может проводиться как в одну, так и в несколько стадий.

Многостадийный гидроразрыв пласта (МГРП) – широко используемый и эффективный способ увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов, рассматриваемый как технология добычи трудноизвлекаемой нефти.

Технология проведения ГРП заключается в создании трещины высокой проводимости в интервале пласта под действием закачиваемой в него под давлением жидкости, что обеспечит в свою очередь приток флюида к забою скважины.

Процедура ГРП дает возможность «реанимировать» скважины, добыча флюида в которых малорентабельна или вовсе невозможна [1–3].

В то же время компаниям-недропользователям не всегда удается достичь проектных показателей и рентабель-

ности от проводимой операции МГРП, вследствие чего компании несут значительные финансовые убытки. Поэтому возникает необходимость в совершенствовании технологии МГРП, а также в сохранении экологической ситуации в зоне проведения операции на высоком уровне. Решением этой проблемы является применение потокоотклоняющих герметизирующих шаров BioBalls.

Конструкция потокоотклоняющих шаров BioBalls представляет собой непрозрачные шарики правильной формы с гладкой поверхностью (рис. 1). Все компоненты – биоразлагаемые водорастворимые вещества. В состав данной конструкции входят: поливиниловый спирт, полилактид, полиэфирная смола [4, 5].

Каждая вариация отличается температурным диапазоном и областью применения:

- BioBalls L применяются в температурном диапазоне 24–93 °С, рекомендуется использовать с slickwater, линейным гелем, сшитым гелем и при кислотной обработке [6];

- BioBalls H применяются в температурном диапазоне 79–149 °С, рекомендуется использовать с slickwater, линейным и сшитым гелем, не рекомендуется при кислотной обработке [7];
- BioBalls X применяются в температурном диапазоне 93–149 °С, рекомендуется использовать с slickwater, линейным гелем, сшитым гелем и при кислотной обработке [8].



**Рис. 1.** Конструкция потокоотклоняющих шаров BioBalls компании Covia в трех вариациях [1]: 1) BioBalls L; 2) BioBalls H; 3) BioBalls X

**Fig. 1.** Covia BioBalls flow diverting design in three variations: 1) BioBalls L; 2) BioBalls H; 3) BioBalls X

Применение потокоотклоняющих шаров возможно как в широком интервале температур, так и в широком интервале значений pH – от 0 до 12 единиц.

Шары BioBalls растворяются в полярных растворителях (вода, рассолы и т. д.) и нерастворимы в неполярных растворителях (ВТХ, дизель, керосин) [9–12].

Непосредственной задачей потокоотклоняющих шаров является закупоривание перфорационных отверстий, за счет чего происходит отклонение потока жидкости ГРП к следующему интервалу перфорации. Шары доставляются в интервал перфорации жидкостью разрыва. При этом при перекрытии шарами интервала перфорации происходит рост давления и последующий гидроразрыв пласта на следующий целевой интервал.

В 2015 г. на скважине № 9101 Шаимского нефтяного месторождения выполнены работы по изоляции объектов ЮК<sub>4</sub> и PZ, вскрытие объектов ЮК<sub>2</sub>, ЮК<sub>3</sub> и проведение на них поочередно двух стадий ГРП. По геофизическим данным пласты общей толщиной 33,3 м имеют среднюю нефтенасыщенность и слабую проницаемость. Начальная пластовая температура 92 °С. Текущее пластовое давление – 192 атм.

Для определения наиболее вероятного распространения первой стадии ГРП и расчета количества подаваемых с устья скважины потокоотклоняющих шаров BioBalls, а также отсекаемого данного интервала перфорации и отклонения потока жидкости разрыва во второй интервал, выполнено определение профиля приемистости целевых интервалов под закачкой. Результаты показали, что 60 % закачиваемой жидкости будет приниматься пластом ЮК<sub>2</sub>, остальные 40 % – пластом ЮК<sub>3</sub>. Учитывая факт меньшего горного давления и напряжения на верхний пласт, определено, что точка инициации разрыва располагается в пласте ЮК<sub>2</sub>. Исходя из этого, количество шаров должно превышать количество перфорационных отверстий согласно технологии (с превышением количества блокируемых перфорационных отверстий на 20...100 % для обеспечения качественной изоляции целевого интер-

вала в случае не посадки отдельных шаров), поэтому в программу закачки было заложено 290 потокоотклоняющих шаров BioBalls.

Шары BioBalls подавались с устья в поток через специализированные эжекторы с дистанционным управлением при завершении последней проппантной стадии и в объем жидкости продавки с одновременным снижением темпа закачки. После скачка устьевого давления, характеризующего посадку шаров в перфорационные отверстия и отклонение потока жидкости разрыва, темп закачки повышался до рабочего.

Анализ ГРП показал совпадение эффективности закачиваемой жидкости, градиента разрыва и эффективного давления с проектными параметрами.

В первый объект ЮК<sub>2</sub> закачено 30 т проппанта при максимальной концентрации 900 кг/м<sup>3</sup> и темпе закачки от 2,6 до 3,8 м<sup>3</sup>/мин. С устья скважины подано расчетное количество шаров. Темп закачки снизился до 2,2 м<sup>3</sup>/мин. После этого был зарегистрирован скачок устьевого давления закачки, свидетельствующий об изоляции перфорационных отверстий шарами BioBalls, и выполнена вторая стадия ГРП.

Во второй объект ЮК<sub>3</sub> закачено 14,8 т проппанта при максимальной концентрации 1200 кг/м<sup>3</sup> и темпе закачки от 2,6 до 3,8 м<sup>3</sup>/мин.

Всего в объекты ЮК<sub>2</sub> и ЮК<sub>3</sub> было закачено 44,8 т проппанта.

Вся операция МГРП заняла двое суток без учета предварительных исследований, подготовки скважины и послеоперационных работ [13–20].

Интерпретированный профиль созданных трещин и распределение проппанта в трещине представлены на рис. 2.

Результаты проведения процедуры МГРП и сравнение режима работы скважины № 9101 (таблица):

1. До проведения процедуры МГРП с применением BioBalls скважина № 9101 Шаимского нефтяного месторождения находилась в пьезометрическом фонде, после проведения операции режим сква-

жины за 1 месяц составил: дебит нефти 5 т/сут, дебит жидкости 51 т/сут, обводненность 90 %. Фактический прирост составил по нефти 5 т/сут, по жидкости 51 т/сут. Скважина переведена в действующий фонд.

2. Режим скважины спустя три месяца составил: дебит нефти 12,9 т/сут, дебит жидкости 41,7 т/сут, обводненность 69 %. Фактический прирост составил по нефти 12,9 т/сут, по жидкости 41,7 т/сут. Скважина высокодебитная и малообводненная.

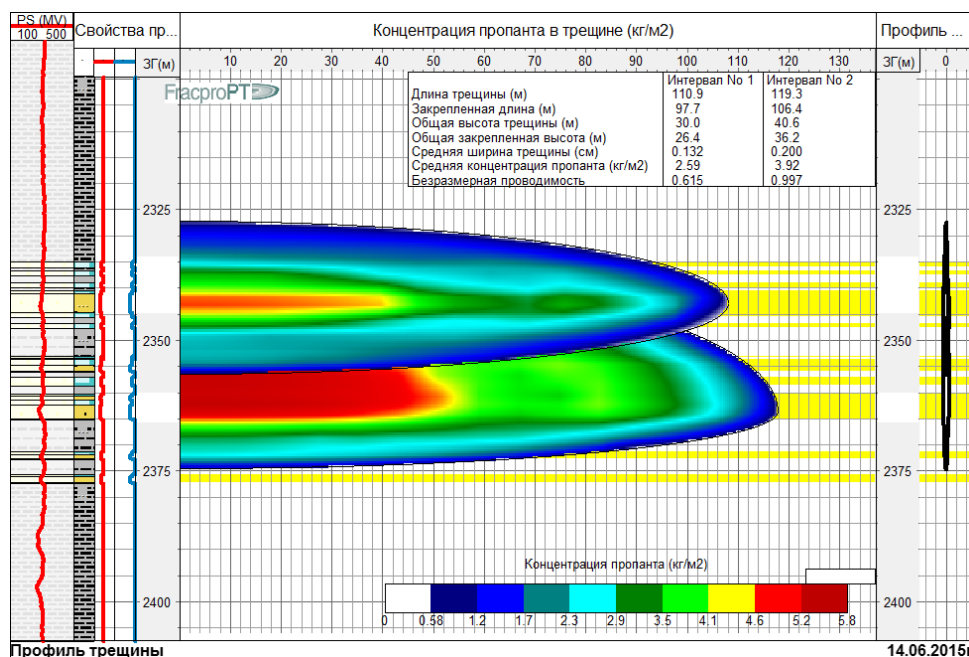


Рис. 2. Профиль созданных трещин в скважине № 9101

Fig. 2. Created fracture profile in well no. 9101

Таблица. Режим работы скважины № 9101

Table. Well no. 9101 operating mode

Режимдо ОНР Pilot operating mode			Режим через 1 месяц Operating mode in a month			Прирост фактический Actual growth		Режим через три месяца Operating mode in three months			Прирост фактический Actual growth	
Qн	Qж	% H <sub>2</sub> O	Qн	Qж	% H <sub>2</sub> O	Qн	Qж	Qн	Qж	% H <sub>2</sub> O	Qн	Qж
т/сут			т/сут			т/сут			т/сут			
0,0	0,0	0	5,0	51,0	90	5,0	51,0	12,9	41,7	69	12,9	41,7

Полученные результаты показали высокую эффективность применения технологии в данных условиях при МГРП скважины № 9101 Шаимского нефтяного месторождения.

На основе вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Относительная простота проведения – отсутствие большого числа спускоподъемных операций и дополнительных затрат по капитальному ремонту скважин.
2. Скорость работ, затраченная на МГРП скважины № 9101 Шаимского нефтяного месторождения, в 3,5 раза выше, чем при проведении стандартного МГРП.
3. Возможность комплексной разработки дизайна МГРП для большей его эффективности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркелова О.В. ГРП – эффективный метод повышения нефтеотдачи (на примере приобского месторождения нефти) // Академический журнал Западной Сибири. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 20–21.
2. Шапенков Д.В. Некоторые вопросы проведения ГРП в условиях Западной Сибири // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 149–150.

#### Заключение

Рациональный подход к проведению ГРП позволил достичь перевода скважины из бездействующего фонда в действующий, а также вывести скважину на стабильный режим работы. Внедрение технологии закачки потокоотклоняющих герметизирующих шаров BioBalls оптимизирует процедуру МГРП, позволяя при этом уменьшить время на спускоподъемные операции и вероятность аварий на скважине.

Авторы благодарят Дарью Алексеевну Ермохину за перевод аннотации статьи на английский язык и замечания, способствующие улучшению понимания и восприятия материала.

3. Опыт разработки нефтегазовых месторождений с применением гидроразрыва пласта / Д.А. Мараков, Е.И. Краснова, В.В. Инякин, М.И. Забоева, Е.Е. Левитина // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10. – № 5. – С. 117–120.
4. Enhanced Well Solutions // Covia. 2019. URL: <https://www.coviacorp.com/energy/enhanced-well-solutions/> (дата обращения: 11.04.2020).
5. Щерба В.А., Сергеев А.О. Особенности применения технологии многостадийного гидроразрыва пласта // Новые направле-

- ния нефтегазовой геологии и геохимии. Развитие геологоразведочных работ. – 2017. – Т. 7. – С. 403–409.
6. Technical data sheet of diverting fluid agents Bioballs L // Covia. 2019. URL: [https://www.coviacorp.com/media/tvmfdpa0/covia\\_standard\\_buoyant\\_bioballs\\_l\\_tds.pdf](https://www.coviacorp.com/media/tvmfdpa0/covia_standard_buoyant_bioballs_l_tds.pdf) (дата обращения: 11.04.2020).
  7. Technical data sheet of diverting fluid agents Bioballs H // Covia. 2019. URL: [https://www.coviacorp.com/media/qaqlzz14/covia\\_standard\\_buoyant\\_bioballs\\_h\\_tds.pdf](https://www.coviacorp.com/media/qaqlzz14/covia_standard_buoyant_bioballs_h_tds.pdf) (дата обращения: 11.04.2020).
  8. Technical data sheet of diverting fluid agents Bioballs X // Covia. 2019. URL: [https://www.coviacorp.com/media/53effg3x/covia\\_standard\\_buoyant\\_bioballs\\_x\\_tds.pdf](https://www.coviacorp.com/media/53effg3x/covia_standard_buoyant_bioballs_x_tds.pdf) (дата обращения: 11.04.2020).
  9. Данилов Д. Анализ проведения многостадийных гидроразрывов пластов в ОАО НК «Роснефть» // Вестник науки и образования. – 2018. – № 16-2 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-provedeniya-mnogostadiynyh-gidrorazryvov-plastov-v-oao-nk-rosneft> (дата обращения: 11.04.2020).
  10. Колыхалов И.В., Панов А.В., Скулкин А.А. О развитии трещин при повторном многостадийном гидроразрыве пласта вязкой жидкостью // Науки о Земле. Современное состояние. – 2018. – Т. 5. – С. 39–41.
  11. Аминев И.С., Шарафутдинов Э.М. Оценка применения многостадийного гидроразрыва пласта // Материалы 46-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием. – Уфа: УГНТУ, 2019. – С. 3–5.
  12. Развитие технологии многостадийного гидроразрыва пласта в ОАО «Самотлорнефтегаз» / Р.Р. Гайфуллин, В.В. Горин, С.С.Кудря, В.Р. Харисов // Научно технический вестник ОАО НК «Роснефть». – 2014. – № 2. – С. 23–30.
  13. Программа реализации опытно-промышленных работ по теме: «Проведение ГРП с применением потокоотклоняющих перфорационных шаров BioBalls» на месторождениях ТПП «Урайнефтегаз». – Тюмень: ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени, 2016. – 37 с.
  14. Дополнение к проекту разработки месторождений Шаимского нефтегазоносного района // ЦКР Роснедра по УВС. – 2013. – № 96-13.
  15. Регламент на проведение работ по повышению нефтеотдачи высокообводненных пластов с применением потокоотклоняющих перфорационных шаров BioBalls. – М.: Вестник науки и образования, 2013. – 9 с.
  16. Реутов В.А. Гидравлический разрыв пласта: условия образования трещин, их практическое определение и использование // Итоги науки и техники. Разработка нефтяных и газовых месторождений. – 1991. – Т. 23. – С. 73–153.
  17. Warpinski N.R. Hydraulic fracturing in tight, fissured media // Journal of Petroleum Technology. – 1991. – V. 43. – № 2. – P. 146–209.
  18. Appleton J., Rivenbark M. Cemented versus open hole completions: what is best for your well? // SPE Unconventional Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. – 2013. – V. 5. – P. 25–29.
  19. Miller C.K., Waters G.A., Rylander E.I. Evaluation of production log data from horizontal wells drilled in organic shales // North American Unconventional Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. – 2011. – V. 3. – P. 44–47.
  20. Wozniak G. Frac sleeves: is milling them out worth the trouble? // Tight Gas Completions Conference. Society of Petroleum Engineers. – 2010. – V. 4. – P. 18–27.

Поступила: 28.05.2020 г.

#### Информация об авторах

**Терпинская В.В.**, студент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Абрамов П.А.**, студент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

**Карпова Е.Г.**, старший преподаватель отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.276.66

## APPLICATION OF FLOW DIVERTING SEALING BIOBALLS DURING MULTISTAGE HYDRAULIC FRACTURING

Viktoria V. Terpinskaya<sup>1</sup>,  
vvt26@tpu.ru

Pavel A. Abramov<sup>2</sup>,  
neon\_5.94@mail.ru

Evgenia G. Karpova<sup>1</sup>,  
karpovaeg@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Tyumen Industrial University,  
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to optimize multistage hydraulic fracturing that will ensure correspondence of the parameters of completed wells with multistage hydraulic fracture and its expected parameters by selective isolation of interlayers to conduct selective hydraulic fracturing of each well zone. This will allow subsurface users to enhance the process profitability and increase wells daily production rate that will also lead to a positive economic effect.

**The main aim** is to analyze the technology results and application example of flow diverting balls BioBalls on well no. 9101 of the Shaim oilfield, highlight the advantages of this method for multistage hydraulic fracturing.

**Objects:** perforation flow diverting sealing balls BioBalls and its effectiveness for perforations isolation.

**Methods:** determining the injectivity profiles of target intervals, comparing the rock pressure of the productive formations to determine the fracture initiating point, analyzing the hydraulic fracturing performance parameters to establish correspondence with the design data, comparing operation parameters of well no. 9101 before and after the multistage hydraulic fracturing to determine the effectiveness of the process, monitoring of well operation to determine operating modes in three months after the process.

**Results.** The paper presents the characteristic of balls BioBalls and geological and physical characteristics of isolation objects; the injectivity profile of the target intervals under the injection is determined; correspondence of the multistage hydraulic fracturing effectiveness and design parameters is obtained; the time of the multistage hydraulic fracturing process is determined; the results of the multistage hydraulic fracturing process using flow diverting balls BioBalls are obtained, which demonstrates the effectiveness of the method in these conditions, namely the transfer of well no. 9101 to the existing well stock, an increase in oil production rates and a decrease in water cut.

### Key words:

Well, productive formation, multistage hydraulic fracture, flow diverting balls, BioBalls.

The authors appreciate Daria A. Ermokhina for translating the abstract into English and for commentaries contributing to better comprehension and perception of the material.

### REFERENCES

- Markelova O.V. Hydraulic fracturing is an effective method of increasing oil recovery (using the example of the Priobskoe oil field). *Academic Journal of Western Siberia*, 2013, vol. 9, pp. 20–21. In Rus.
- Shapenkov D.V. Some issues of hydraulic fracturing in Western Siberia. *Academic Journal of Western Siberia*, 2014, vol. 10, pp. 149–150. In Rus.
- Marakov D.A., Krasnova E.I., Inyakin V.V., Zaboieva M.I., Levitina E.E. Experience in the development of oil and gas fields using hydraulic fracturing. *Academic Journal of Western Siberia*, 2014, vol. 10, pp. 117–120. In Rus.
- Enhanced Well Solutions. Available at: <https://www.coviacorp.com/energy/enhanced-well-solutions/> (accessed 11 April 2020).
- Shcherba V.A., Sergeev A.O. Features of the application of multistage hydraulic fracturing technology. *New directions in oil and gas geology and geochemistry. Development of exploration work*, 2017, vol. 7, pp. 403–409. In Rus.
- Technical data sheet of diverting fluid agents Bioballs L. Available at: [https://www.coviacorp.com/media/tvmfdpa0/covia\\_standard\\_buoyant\\_bioballs\\_l\\_tds.pdf](https://www.coviacorp.com/media/tvmfdpa0/covia_standard_buoyant_bioballs_l_tds.pdf) (accessed 11 April 2020).
- Technical data sheet of diverting fluid agents Bioballs H. Available at: [https://www.coviacorp.com/media/qaqlzz14/covia\\_standard\\_buoyant\\_bioballs\\_h\\_tds.pdf](https://www.coviacorp.com/media/qaqlzz14/covia_standard_buoyant_bioballs_h_tds.pdf) (accessed 11 April 2020).
- Technical data sheet of diverting fluid agents Bioballs X. Available at: [https://www.coviacorp.com/media/53effg3x/covia\\_standard\\_buoyant\\_bioballs\\_x\\_tds.pdf](https://www.coviacorp.com/media/53effg3x/covia_standard_buoyant_bioballs_x_tds.pdf) (accessed 11 April 2020).
- Danilov D. Analysis of multi-stage hydraulic fracturing in NK Rosneft. *Herald of science and education*, 2018, no. 16-2, pp. 52. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-provedeniya-mnogostadiynyh-gidrorazryvov-plastov-v-oao-nk-rosneft> (accessed 11 April 2020).
- Kolykhalov I.V., Panov A.V., Skulkin A.A. On the development of cracks during repeated multistage hydraulic fracturing by a viscous fluid. *Earth Sciences. The current state*, 2018, vol. 5, pp. 39–41. In Rus.
- Aminev I.S., Sharafutdinov E.M. Otsenka primeneniya mnogostadiynogo gidrorazryva plasta [Evaluation of the use of multi-stage hydraulic fracturing]. *Materialy 46-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov s mezhdunarodnym uchastiyem* [Materials of the 46<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Technical Conference of young scientists, graduate students and students with international participation]. Ufa, UGNTU Publ., 2019. Vol. 1, pp. 3–5.
- Gayfullin R.R., Gorin V.V., Kudrya S.S., Kharisov V.R. Development of multistage hydraulic fracturing technology at OJSC Samotorneftegaz. *Scientific and Technical Bulletin of OJSC Rosneft Oil Company*, 2014, no. 2, pp. 23–30. In Rus.



13. Programma realizatsii opytno-promyshlennykh rabot po teme: «Provedenie GRP s primeneniem potokootklonyayushchikh perforatsionnykh sharov BioBalls» na mestorozhdeniyakh TPP «Uraineftegaz» [Implementation of the pilot program on the topic Hydraulic fracturing using flow diverting perforation balls BioBalls at the Uraineftegaz TPP field]. *LUKOIL-Engineering LLC KogalymNIPIneft*, 2016. vol. 37, pp. 1–15.
14. Dopolnenie k proektu razrabotki mestorozhdeniy Shaimskogo neftegazonosnogo rayona [Addition to the project for the development of oilfields in the Shaim oil and gas region]. *CCR Rosnedra for HCS*, 2013, no. 13, pp. 90–96.
15. Reglament na provedenie rabot po povysheniyu nefteotdachi vysokoobvodnennykh plastov s primeneniem potokootklonyayushchikh perforatsionnykh sharov BioBalls [The procedure for the enhancement of oil recovery in highly watered formations using flow diverting perforation balls BioBalls]. *Bulletin of science and education*, 2013, vol. 9, pp. 1–8.
16. Reutov V.A. Hydraulic fracturing: conditions for the formation of cracks, their practical definition and use. *Itogi Nauki i Tekhniki. Development of oil and gas fields*, 1991, vol. 23, pp. 73–153. In Rus.
17. Warpinski N.R. Hydraulic fracturing in tight, fissured media. *Journal of Petroleum Technology*, 1991, vol. 43, no. 2, pp. 146–209.
18. Appleton J., Rivenbark M. Cemented versus open hole completions: what is best for your well? *SPE Unconventional Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*, 2013, vol. 5, pp. 2–7.
19. Miller C. K., Waters G.A., Rylander E.I. Evaluation of production log data from horizontal wells drilled in organic shales. *North American Unconventional Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers*, 2011, vol. 3, pp. 5–22.
20. Wozniak G. Frac sleeves: is milling them out worth the trouble? *Tight Gas Completions Conference. Society of Petroleum Engineers*, 2010, vol. 4, pp. 3–9.

Received: 28 May 2020.

#### Information about the authors

**Viktoria V. Terpinskaya**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Pavel A. Abramov**, student, Tyumen Industrial University.

**Evgenia G. Karpova**, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ПРИ ЗАВОДНЕНИИ МОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ТЯЖЕЛОЙ НЕФТЬЮ

Се Кун<sup>1</sup>,  
xiekun725@163.com

Мэй Цзе<sup>1</sup>,  
sichuandexuesheng@163.com

Нажису<sup>2</sup>,  
Narisu33@126.com

Ерофеев Владимир Иванович<sup>2</sup>,  
erofeevvi@mail.ru

Су Ченг<sup>1</sup>,  
380500259@qq.com

Цзян Вэйдун<sup>3</sup>,  
1543284194@qq.com

Лу Сянго<sup>1</sup>,  
877459272@qq.com

<sup>1</sup> Северо-Восточный нефтяной университет,  
Китай, 163000, г. Дацин, ул. Развития, 199.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>3</sup> CNOOC Ltd.,  
г. Пекин, район Дунчэн, ул. Дунчжимэнвай, 6.

**Актуальность.** По сравнению с традиционными месторождениями нефти, на морских месторождениях с тяжелой нефтью существует много проблем, связанных с низкой нефтеотдачей заводнения. Если бы мы обладали более глубокими знаниями о фильтрационных характеристиках водной и нефтяной фаз, это было бы очень полезно для улучшения состояния нефтеотдачи заводнения пласта с тяжелой нефтью.

**Цель:** изучение закономерностей изменения фильтрационных характеристик водной и нефтяной фаз в морском месторождении с тяжелой нефтью, которые очень важны для решения задач разработки нефтяных месторождений и могут представлять руководство для создания моделей численного моделирования.

**Методы.** Были учтены геологические характеристики пласта, флюидные свойства и технология строительства морского нефтяного месторождения Бохай с тяжелой нефтью. Влияние проницаемости керна, вымывания воды и вязкости нефти на кривую относительной проницаемости и эффективность вытеснения нефти заводнения было исследовано по методу нестационарного состояния. Изменение внутренней структуры керна представлено с помощью компьютерной томографии и ртутного теста давления.

**Результаты.** С увеличением проницаемости керна относительная проницаемость водной фазы увеличивается, объем охвата водной фазы становится больше, поток двухфазного флюида становится шире и конечная нефтеотдача пластов увеличивается. Функция «очистки» и «эрозии», которая образуется от вымывания водой, оказывает влияние на структуру пор керна, увеличивает радиус порового канала керна и проницаемость керна, и ее влияние – на кривую относительной проницаемости и эффективность вытеснения нефти такое же, как влияние на увеличение проницаемости. С увеличением вязкости нефти способность регулирования подвижности воды ослабевает в процессе заводнения, объем охвата вытесняемой водной фазы уменьшается, сужается диапазон двухфазного потока, а конечная нефтеотдача уменьшается.

### Ключевые слова:

Морское нефтяное месторождение, резервуар тяжелой нефти, заводнение, относительная проницаемость, метод нестационарного состояния, нефтеотдача.

### Введение

Морское нефтяное месторождение Бохай богато запасами тяжелой нефти [1, 2], но под влиянием осадочной среды в процессе разработки месторождения тяжелой нефти возникают такие проблемы, как высокая вязкость нефти, несцементированная структура породы и большая неоднородность пласта, которые приводят к долгосрочному низкому эффекту разработки заводнения, а степень извлечения нефти обычно составляет менее 18 % [3–6]. В связи с этим важно исследовать механизм фильтрации пластовых флюидов в процессе разработки нефтяного месторождения с тяжелой нефтью при заводнении, чтобы установить

рациональный план разработки и принять меры по повышению нефтеотдачи пластов. В процессе разработки месторождения при заводнении очень важно использовать кривую относительной проницаемости нефтяной и водной фаз для уточнения характеристик фильтрации нефти и воды в пласт для повышения нефтеотдачи пластов [7–11]. Однако из-за несцементированной структуры породы коллектора отбор керна на морском месторождении затруднен и керн становится рыхлым песком после того, как его извлекают из пласта на поверхность. Исследования относительной проницаемости нефтяной и водной фаз с использованием природных кернов в основном сосредоточены на обычных песчаниковых, низкопроницаемых

и плотных коллекторах, однако очень мало исследований относительной проницаемости нефтяной и водной фаз и эффективности вытеснения нефти при заводнении на морских месторождениях с тяжелой нефтью [12–15]. Кроме того, в отличие от режима разработки наземного нефтяного месторождения, морское нефтяное месторождение ограничено сроком службы платформы и эксплуатационными расходами и обычно принимается режим «сильной закачки и сильной добычи». Ежедневный объем закачки одной скважины может достигать тысяч кубометров. Таким образом, вымывание закачиваемой воды на нецементированную структуру породы приведет к значительному увеличению проницаемости пласта, что сильно влияет на фильтрационные характеристики двухфазного флюида [16–19]. В данной работе были учтены геологические характеристики пласта, флюидные свойства и технология строительства морского нефтяного месторождения Бохай с тяжелой нефтью. На основе разработки искусственных кернов с рыхлой структурой песчаника на морских нефтяных месторождениях оптимизируется

метод испытаний кривой относительной проницаемости. По методу нестационарного состояния было исследовано влияние проницаемости керна, вымывания воды и вязкости нефти на кривую относительной проницаемости и эффективность вытеснения нефти заводнением. Результаты исследования дают теоретическое обоснование работ по повышению нефтеотдачи пластов тяжелой нефти.

#### Экспериментальная часть

**Материалы для эксперимента.** Нефть, использованная в экспериментах, представляет собой дегазированную нефть из месторождения SZ36-1, смешанную с керосином. Вязкость нефти при температуре пласта 65 °C составляла 70, 310, 530, 840, 1210 и 1580 мПа·с. В качестве технологической воды для проведения опытов использовалась нагнетаемая пластовая вода нефтяного месторождения SZ36-1. Общая степень минерализации составляла 9947,8 мг/л, массовые концентрации ионов представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Анализ качества воды

**Table 1.** Water quality analysis

Состав ионов Ionic composition	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Общая степень минерализации General degree of mineralization
Массовая концентрация иона (мг/л) Mass concentration of ion (mg/L)	275,6	305,5	3090,2	0,0	311,5	5879,7	85,3	9947,8

**Керны.** В эксперименте использовались искусственные керны, которые были изготовлены из кварцевых песков и природных нефтяных песков, цементированных эпоксидной смолой. Искусственные керны были разработаны для моделирования структуры неконсолидированного песчаника на морском нефтяном месторождении. Газопроницаемость кернов составляла  $1000 \times 10^{-3}$ ,  $2500 \times 10^{-3}$  и  $5000 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Геометрический размер керна: Ø2,5 см×8 см.

**Методы и план эксперимента.** Относительная проницаемость и эффективность вытеснения нефти двухфазным флюидом в горных породах определялись методом нестационарного состояния по Стандарту газовой промышленности Китайской Народной Республики SY/T 5345-2007.

Экспериментальные этапы метода стационарного состояния заключаются в следующем:

- 1) При комнатной температуре керн вакуумируется и насыщается водой.
- 2) При 65 °C связанную воду, полученную из насыщенной смоделированной нефти, вытесняют нефтью. Затем определяют фазовую проницаемость по нефти при насыщении связанной водой и записывают давление насыщения.
- 3) При 65 °C и стабильной общей скорости закачки жидкости нефть и вода были закачены в керн в соотношении 20:1, 10:1, 5:1, 1:1, 1:5 и 1:10. После того, как поток становился стабильным, записывали перепад давлений, расход нефти и воды на выходе до конца эксперимента.
- 4) Насыщенность связанной водой различных периодов вычислялась методом материального баланса,

а относительная проницаемость двух фаз – методом «J·B·N», и строили кривую фазовой проницаемости.

Экспериментальные этапы метода нестационарного состояния заключаются в следующем:

- 1) При комнатной температуре керн вакуумируется и насыщается водой.
- 2) При 65 °C связанную воду, полученную из насыщенной смоделированной нефти, вытесняют нефтью. Затем определяют фазовую проницаемость по нефти при насыщении связанной водой и записывают давление насыщения.
- 3) Для того, чтобы исключить конечный эффект при 65 °C, нефть вытесняют водой с постоянной скоростью 0,8 мл/мин. Фиксируют время появления воды, объем накопленной добычи нефти и накопленной добычи жидкости, перепад давлений между двумя концами керна во время появления воды. В зависимости от объема добычи нефти выбирают соответствующий временной интервал и постепенно расширяют интервал записи. При условии обводненности 100 % определяют проницаемость водной фазы при остаточной нефтенасыщенности.
- 4) Насыщенность связанной водой различных периодов вычислялась методом материального баланса, а относительная проницаемость двух фаз – методом «J·B·N», и строили кривую фазовой проницаемости.
- 5) Вычисляли эффективность вытеснения нефти, и строили кривую зависимости между эффективностью вытеснения нефти и кратностью объема пор закачки воды.

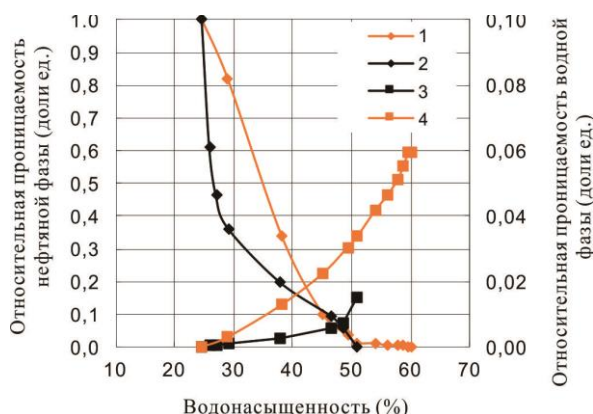
**Аппаратура.** Вязкость исследуемых образцов была определена с использованием вискозиметра Брукфилда DV-II, скорость вращения составляла 6 об/мин, а температура испытания – 65 °С. Экспериментальная установка вытесняющего эксперимента состояла из насоса, датчика давления, кернодержателя, ручного насоса, промежуточного контейнера и других деталей. За исключением насоса, остальные детали были помещены в термостат с температурой 65 °С. Сканирующий электронный микроскоп (SEM) Hitachi S-3400N и компьютерная томография высокого разрешения SkyScan1172 использовались для анализа изменений структуры пор зерна до и после заводнения, а автоматический прибор для закачки ртуты 9520 – для измерения среднего радиуса пор зерна.

### Результаты и их обсуждение

**Метод испытания относительной проницаемости.** Относительные проницаемости заводнения в условиях различных методов испытаний приведены в табл. 2 и на рис. 1 соответственно.

Из табл. 2 и рис. 1 видно, что тенденция изменения относительной проницаемости заводнения при стационарном и нестационарном методах в основном одинакова, но разница в фазовой проницаемости воды обусловлена различными экспериментальными методами и методами обработки данных. Учитывая большую рабочую нагрузку (сложная операция и длительное время) стационарного метода и склонность к ошибкам в экспериментальном процессе, существующее исследование относительной проницаемости в основном использует нестационарный метод, который имеет много справочных материалов. Кроме того, метод нестационарного состояния может удо-

влетворять спрос на испытание эффективности вытеснения. В связи с этим в последующих экспериментах используется метод нестационарного состояния для испытания фазовой проницаемости.



**Рис. 1.** Кривые относительной проницаемости в условиях различных методов испытаний: 1 – относительная проницаемость нефтяной фазы по методу нестационарного состояния; 2 – относительная проницаемость нефтяной фазы по методу стационарного состояния; 3 – относительная проницаемость водной фазы по методу стационарного состояния; 4 – относительная проницаемость водной фазы по методу нестационарного состояния

**Fig. 1.** Relative permeability curves under different test methods: 1 – oil phase relative permeability by the unsteady state method; 2 – oil phase relative permeability by the steady state method; 3 – aqueous phase relative permeability by the steady state method; 4 – aqueous phase relative permeability by the unsteady state method

**Таблица 2.** Результаты исследования эффективности вытеснения нефти и эксперимента насыщенности

**Table 2.** Results of oil displacement efficiency and saturation experiment

Методы испытаний Test method	Параметры Parameters	Номер керна Core number	Вязкость нефти (мПа·с) Oil viscosity (mPa·s)	Проницаемость ( $10^{-3}$ мкм <sup>2</sup> ) Permeability ( $10^{-3}$ $\mu$ m <sup>2</sup> )	Насыщенность связан- ной воды (%) Irreducible water saturation (%)	Остаточная нефтенасы- щенность (%) Residual oil saturation (%)
Метод стационарного состояния Steady state method		2500-1	70	2486	24,7	49,0
Метод нестационарного состояния Unsteady state method		2500-4	70	2512	24,6	39,8

**Таблица 3.** Результаты исследования эффективности вытеснения нефти и эксперимента насыщенности

**Table 3.** Results of the oil displacement efficiency and saturation experiment

Номер керна Cores number	Вязкость нефти (мПа·с) Oil viscosity (mPa·s)	Проницаемость ( $10^{-3}$ мкм <sup>2</sup> ) Permeability ( $10^{-3}$ $\mu$ m <sup>2</sup> )	Насыщенность связанной воды (%) Irreducible water saturation (%)	Остаточная нефтенасы- щенность (%) Residual oil saturation (%)	Эффективность вы- теснения нефти (%) Oil displacement efficiency (%)
1000-1	70	1012	28,7	44,1	38,2
2500-4	70	2512	24,6	39,8	46,7
5000-6	70	4985	21,4	35,0	55,5

**Влияние проницаемости зерна на относительную проницаемость флюидов и эффективность вытеснения нефти.** Результаты исследования эффективности вытеснения нефти заводнения и экспериментов насыщенности в условиях различной проницаемости

зерна приведены в табл. 3, а кривые относительной проницаемости, зависимость коэффициента извлечения нефти (КИН) и числа PV (PV (pore volume) – объем пор зерна) приведены на рис. 2, 3.

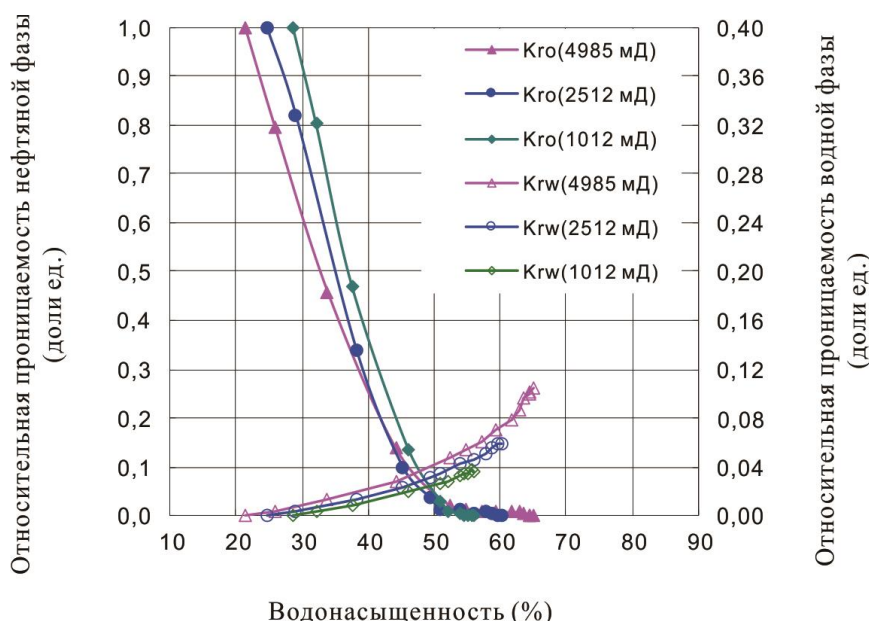


Рис. 2. Кривые относительной проницаемости в условиях различной проницаемости ядра: Kro – нефтяная фаза; Krw – водная фаза

Fig. 2. Relative permeability curves in terms of different permeability core samples: Kro – oil phase; Krw – aqueous phase

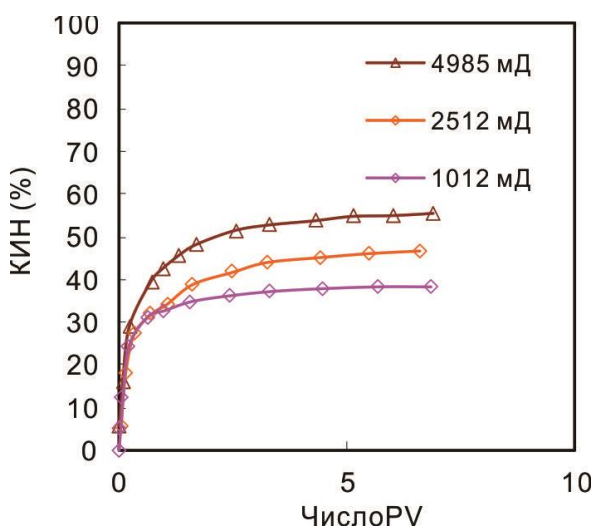


Рис. 3. Кривые зависимости между коэффициентом извлечения нефти и числом PV

Fig. 3. Relation curves between oil recovery and PV number

Из табл. 3, рис. 2, 3 видно, что проницаемость ядра оказывает влияние на относительную проницаемость нефти и воды и эффективность вытеснения нефти в процессе заводнения водой. В процессе вытеснения воды нефтью для создания связанной воды нефтяная фаза вытесняет водную и занимает поровое пространство. Нефтяная фаза размывает «водную пленку» на поверхности порового канала породы, пытаясь занять поверхность породы. Это приводит к тому, что часть «водной пленки» отделяется. В то же время полярные вещества в нефтяной фазе, такие как нафтеновая кислота, смолы и асфальтены, адсорбируются на поверхности порового канала породы с образованием «нефтяной пленки». С увеличением проницаемости ядра средний радиус порового кана-

ла увеличивается и нефтяная фаза может входить в большее количество пор ядра и вытеснять водную фазу, существующую в порах, что приводит к повышению исходной нефтенасыщенности, уменьшению насыщенности связанной воды и увеличению площади «нефтяной пленки» на поверхности породы. С увеличением площади «нефтяной пленки» на поверхности порового канала породы гидрофильность ядра уменьшается и состояние водонефтяного распределения изменяется. Часть связанной воды, первоначально прикрепленной к поверхности порового канала породы в виде «водной пленки», диспергируется в нефтяной фазе в виде капель воды, вызывает эффект Джамина в процессе заводнения и препятствует течению нефтяной фазы, которое приводит к снижению относительной проницаемости нефтяной фазы [20, 21]. Кроме того, за счет увеличения радиуса порового канала уменьшается фильтрационное сопротивление водного раствора в ядре, увеличивается текучесть и площадь охвата, а также относительная проницаемость и коэффициент извлечения нефти.

Таким образом, в процессе заводнения с увеличением проницаемости ядра относительная проницаемость нефтяной фазы уменьшается, относительная проницаемость водной фазы повышается, насыщенность связанной воды и остаточная нефтенасыщенность уменьшаются, изотоническая точка смещается влево, коэффициент извлечения нефти увеличивается.

Влияние вымывания водой на относительную проницаемость флюидов и эффективность вытеснения нефти. Искусственный ядро вымывали нагнетаемой водой (скорость закачки 1,0 мл/мин, объем закачки 400 PV). Снимки компьютерной томографии и сканирующего электронного микроскопа показаны на рис. 4, 5, соответственно.



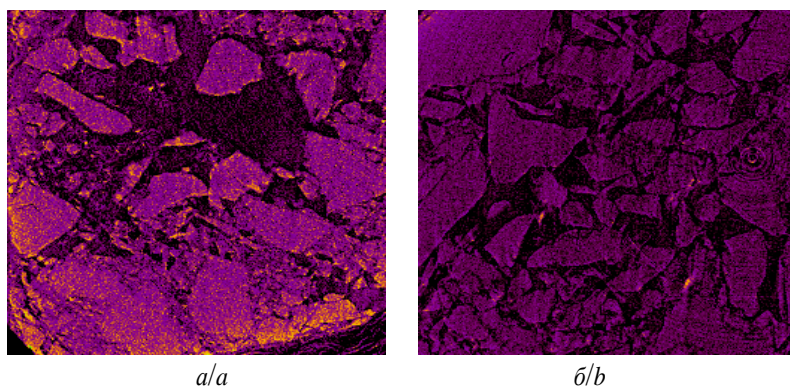


Рис. 4. КТ-снимки ядра (а) до и (б) после вымывания водой  
 Fig. 4. CT images of core (a) before and (b) after water washout

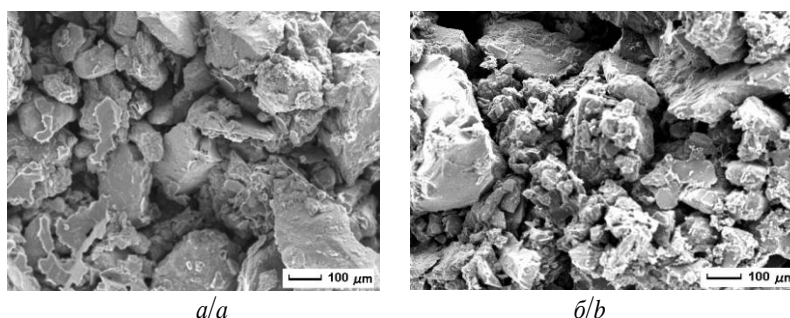


Рис. 5. Снимки сканирующего электронного микроскопа ядра (а) до и (б) после вымывания водой  
 Fig. 5. SEM images of core (a) before and (b) after water washout

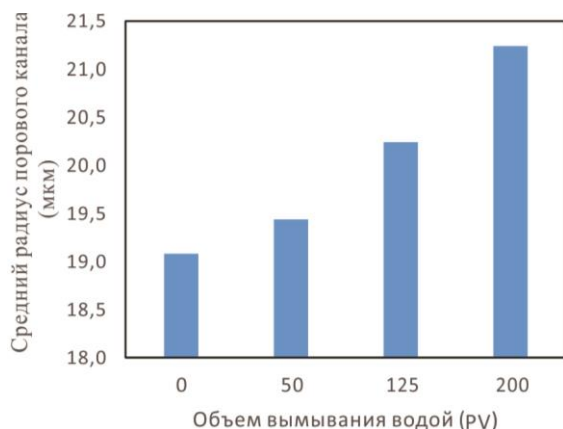


Рис. 6. Средний радиус порового канала кернов до и после вымывания водой  
 Fig. 6. Average throat radius of core before and after water washout

Из рис. 4, 5 видно, что вымывание водой оказывает влияние на структуру пор породы. Размер пор ядра, в которых не было вымывания, невелик и содержит большое количество мелких минеральных остатков. После вымывания водой минеральный остаток в порах ядра вымывается и извлекается с миграцией жидкости, а внутренний поровый канал ядра становится гладким и чистым. Также нагнетаемая вода оказывает денудационное воздействие на поровый канал ядра. Комплексное воздействие вышеуказанных действий заключается в том, что средний радиус порового канала ядра увеличивается (рис. 6). Средний радиус порового канала ядра увеличивается с

повышением объема закачиваемой воды. Таким образом, режим разработки «сильная закачка и сильная добыча» на морском месторождении позволяет значительно повысить проницаемость пластовых пород, поэтому необходимо понимать изменение физических свойств пласта в процессе разработки.

Таблица 4. Результаты исследования эффективности вытеснения нефти и эксперимента насыщения

Table 4. Results of the oil displacement efficiency and saturation experiment

Номер кернов Core number	Вязкость нефти (мПа·с) Oil viscosity (mPa·s)	Объем вымывания водой (PV) Volume of water washout (PV)	Проницаемость ( $10^{-3}$ мкм <sup>2</sup> ) Permeability ( $10^{-3}$ μm <sup>2</sup> )	Насыщенность связанной воды (%) Irreducible water saturation (%)	Остаточная нефтенасыщенность (%) Residual oil saturation (%)	Эффективность вытеснения нефти (%) Oil displacement efficiency (%)
1000-1	70	—	1012	28,7	44,1	38,2
1000-2	70	1000	1008	26,2	35,1	43,7

Испытание относительной проницаемости заводнения проводится для ядра вымывания водой и ядра без вымывания водой соответственно. Результаты исследования эффективности вытеснения нефти и экспериментов насыщения приведены в табл. 4, а

кривые относительной проницаемости, зависимость коэффициента извлечения нефти и числа PV приведены на рис. 7, 8.

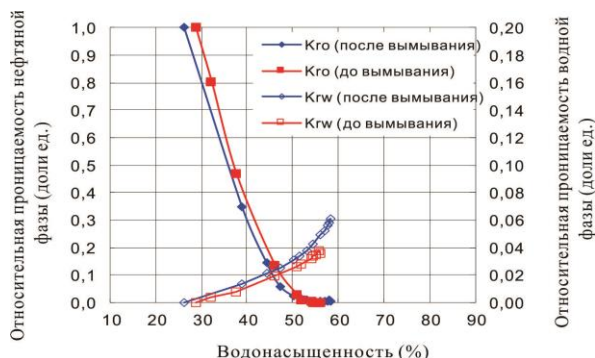


Рис. 7. Кривые относительной проницаемости: Kro – нефтяная фаза; Kgw – водная фаза

Fig. 7. Relative permeability curves of: Kro – oil phase; Kgw – aqueous phase

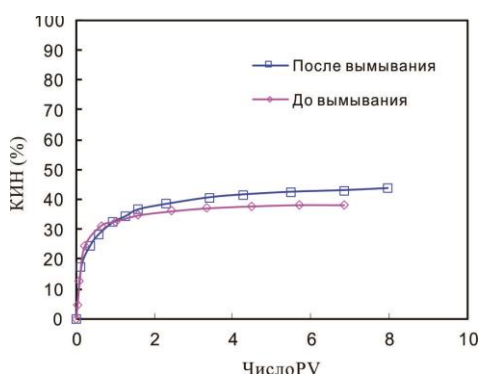


Рис. 8. Кривые зависимости между КИН и числом PV

Fig. 8. Relation curves between oil recovery and PV number

Из табл. 4, рис. 7, 8 видно, что после вымывания водой относительная проницаемость нефтяной фазы уменьшается, относительная проницаемость водной фазы увеличивается, насыщенность связанной воды и остаточная нефтенасыщенность уменьшаются, правая конечная точка кривой смещается вправо, коэффициент извлечения нефти повышается, а изотоническая точка перемещается влево и соответствующее значение относительной проницаемости увеличивается. Долгосрочное вымывание водой может изменить структуру пор зерна, а воздействие «очистки» и «эрозии» увеличивают радиус порового канала. Макроскопически проницаемость зерна увеличивается, и изменения фазовой проницаемости и эффективности

вытеснения нефти такие же, как и при увеличении проницаемости.

Влияние вязкости нефти на относительную проницаемость флюидов и эффективность вытеснения нефти. Результаты исследования эффективности вытеснения нефти заводнением и экспериментов насыщенности в условиях разной вязкости нефти приведены в табл. 5, а кривые относительной проницаемости, зависимость коэффициента извлечения нефти и числа PV приведены на рис. 9, 10.

Из табл. 5, рис. 9, 10 видно, что вязкость нефти оказывает влияние на относительную проницаемость нефти и воды и эффективность вытеснения нефти в процессе заводнения водой. С увеличением вязкости нефти соотношение вязкости нефти и воды растет в процессе создания связанной воды путем закачивания нефти и способность контроля текучести нефтяной фазы повышается, так что создавая большее поровое пространство, можно вытеснить исходную водную фазу из пор. Таким образом, объем охвата нефтяной фазы и первоначальная насыщенность пор нефтью увеличиваются, а насыщенность связанной водой уменьшается. В то же время повышение вязкости нефти может не только усилить воздействие эрозии нефти на «водную пленку» на поверхности породы, но и увеличить количество полярных веществ, прикрепленных к поверхности породы, за счет увеличения содержания нафтеновой кислоты, камеди и асфальтенов в нефтяной фазе. Эти два эффекта проявляются в увеличении площади «нефтяной пленки» на поверхности порового канала породы и ослаблении гидрофильности зерна. С ослаблением гидрофильности зерна изменяются распределение нефти и воды. Часть связанной воды, первоначально прикрепленной к поверхности порового канала породы в виде «водной пленки», превращается в капли воды и диспергируется в нефтяной фазе, в процессе заводнения образуется «эффект Джамина», который препятствует течению нефтяной фазы. Кроме того, сопротивление потока нефти увеличивается с повышением вязкости, поэтому относительная проницаемость нефтяной фазы будет уменьшаться при заводнении водой. Кроме того, с увеличением вязкости нефти повышается соотношение подвижности вытеснявшей и вытесненной фазы, усиливается явление образования языков обводнения, уменьшается эффективный объем охвата фазы вытеснения, которое приводит к снижению относительной проницаемости нефтяной фазы и эффективности вытеснения нефти.

Таблица 5. Результаты исследования эффективности вытеснения нефти и эксперимента насыщенности

Table 5. Results of the oil displacement efficiency and saturation experiment

Номер зернов Cores number	Вязкость нефти (мПа·с) Oil viscosity (mPa·s)	Проницаемость ( $10^{-3}$ мкм <sup>2</sup> ) Permeability ( $10^{-3}$ μm <sup>2</sup> )	Насыщенность связанной воды (%) Irreducible water saturation (%)	Остаточная нефтенасыщенность (%) Residual oil saturation (%)	Эффективность вытеснения нефти (%) Oil displacement efficiency (%)
2500-4	70	2512	24,6	39,8	46,7
2500-5	310	2515	22,5	42,0	45,8
2500-6	530	2480	21,1	44,2	44,0
2500-7	840	2508	19,5	48,7	39,5
2500-8	1210	2485	18,6	50,5	37,9
2500-9	1580	2480	17,7	60,7	34,4



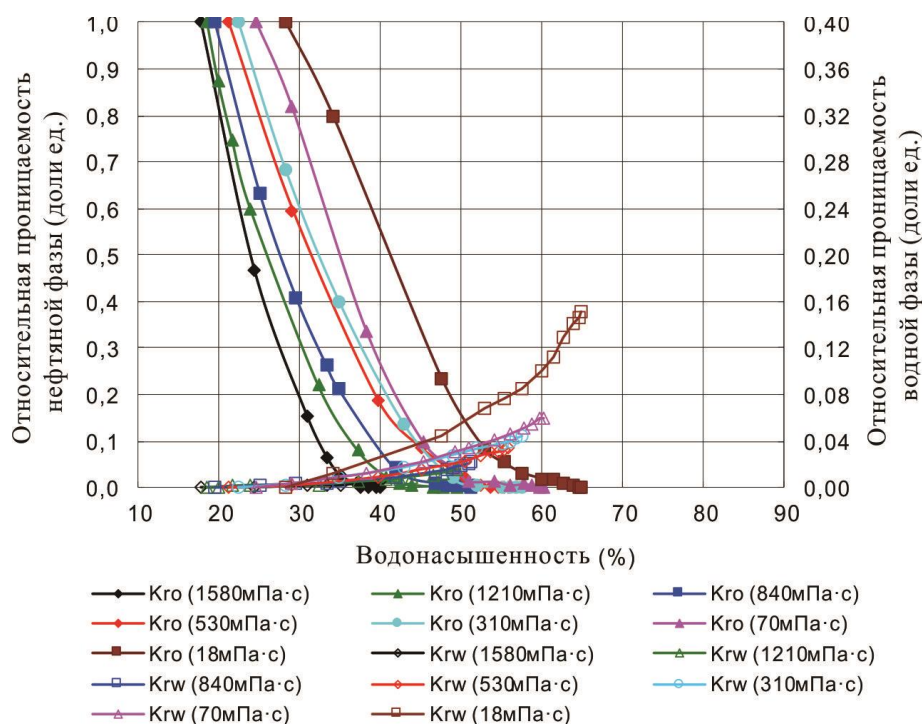


Рис. 9. Кривые относительной проницаемости

Fig. 9. Relative permeability curves

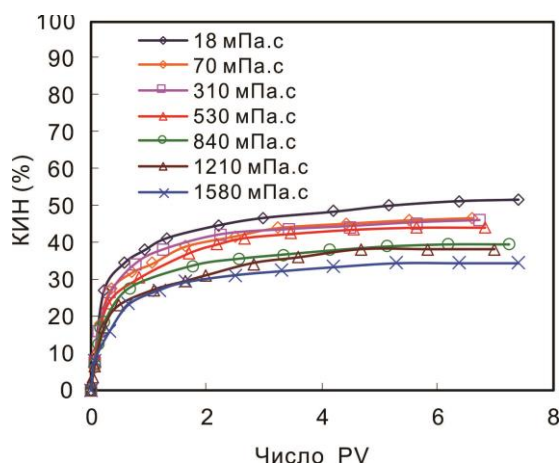


Рис. 10. Кривые зависимости между КИН и числом PV

Fig. 10. Relation curves between oil recovery and PV number

С увеличением вязкости нефти относительная проницаемость нефти и воды уменьшается, насыщенность связанной воды уменьшается, увеличивается остаточная нефтенасыщенность, правая конечная точка кривой и изотоническая точка перемещаются влево, зона пролета двухфазного потока уменьшается и коэффициент извлечения нефти понижается. Таким образом, при разработке месторождения тяжелой нефти вязкость нефти можно снизить с помощью термической обработки, чтобы улучшить текучесть двухфазного потока и увеличить нефтеотдачу пластов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effect of profile-control oil-displacement agent on increasing oil recovery and its mechanism / W. Cao, K. Xie, X. Lu, Y. Liu, Y. Zhang // Fuel. – 2019. – V. 237. – P. 1151–1160.

#### Выводы

1. Проницаемость горных пород оказывает значительное влияние на фильтрационные характеристики водонефтяного двухфазного потока. С увеличением проницаемости ядра относительная проницаемость водной фазы повышается, остаточная нефтенасыщенность уменьшается, зона пролета двухфазного потока увеличивается и коэффициент извлечения нефти повышается.
2. Функция «очистки» и «эрозии», которая возникает от вымывания водой, оказывает влияние на структуру пор ядра, увеличивает радиус порового канала ядра и его проницаемость. Ее влияние на кривую относительной проницаемости и эффективность вытеснения нефти такое же, как влияние на увеличение проницаемости.
3. Увеличение вязкости нефти приводит к снижению относительной проницаемости водной и нефтяной фаз, ослаблению способности регулирования текучести вытесняющей фазы, усилению явления образования языков обводнения, уменьшению объема охвата вытесняющей фазы и зоны пролета двухфазного потока и снижению конечной нефтеотдачи пластов.

Работа выполнена при поддержке Фонда естественных наук Китая (№ 51574086, 51834005), национального научно-технического проекта (2016 ZX05058-003-010), Программы поддержки инновационных талантов Китая (BX20190065).

2. Investigation on polymer reutilization mechanism of salt-tolerant modified starch on offshore oilfield / C. Dai, S. Yang, X. Wu, Y. Liu, D. Peng, K. Wang, Y. Wu // Energy & Fuels. – 2016. – V. 30. – № 7. – P. 5585–5592.

3. Matching between the diameter of the aggregates of hydrophobically associating polymers and reservoir pore-throat size during polymer flooding in an offshore oilfield / K. Xie, B. Cao, X. Lu, W. Jiang, Y. Zhang, Q. Li, K. Song, J. Liu, W. Wang, J. Lv, R. Na // *Journal of petroleum science and engineering*. – 2019. – V. 177. – P. 558–569.
4. Влияние минерализации пластовых вод на физико-химические и фильтрационные характеристики полимерных растворов и гелей для повышения нефтеотдачи пластов / Нажису, В.И. Ерофеев, С. Лу, Ц. Лу, В. Ван, Л. Чжан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 136–145.
5. Research on new technology for offshore heavy oil thermal recovery with rod pumping / Y. Yu, Z. Chang, Y. Qi, D. Feng // *Journal of Petroleum Exploration & Production Technology*. – 2018. – V. 8. – № 3. – P. 947–955.
6. Huang S., Cao M., Cheng L. Experimental study on the mechanism of enhanced oil recovery by multi-thermal fluid in offshore heavy oil // *International Journal of Heat & Mass Transfer*. – 2018. – V. 122. – P. 1074–1084.
7. Kim C., Lee J. Experimental study on the variation of relative permeability due to clay minerals in low salinity water-flooding // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – V. 157. – P. 292–304.
8. Relative permeability variations during low salinity water flooding in carbonate rocks with different mineral compositions / W. Su, Y. Liu, Z. Gao, L. Yang, R. Yang, W. Mcharo, R. Tang // *Journal of Dispersion Science and Technology*. – 2020. – V. 41. – № 2. – P. 227–234.
9. Исследование фильтрационных и реологических свойств полимерного геля для повышения нефтеотдачи пластов / Нажису, В.И. Ерофеев, Ц. Лу, В. Ван // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 147–157.
10. Classification study on relative permeability curves / P. Gong, B. Liu, J. Zhang, Z. Lv, G. Zhang // *World Journal of Engineering and Technology*. – 2018. – V. 6. – № 4. – P. 723–737.
11. Relative permeability of gas for unconventional reservoirs / A. Liu, K. Wang, J. Zang, F. Du, A. Zhou // *Transport in Porous Media*. – 2018. – V. 124. – № 1. – P. 289–307.
12. Zolotukhin A., Yazynina I., Shelyago E. Relative permeability hysteresis for oil-water system in hydrophilic rocks // *Oil Industry Journal*. – 2016. – № 3. – P. 78–80.
13. Wang J., Huiqing L. A novel model and sensitivity analysis for viscoelastic polymer flooding in offshore oilfield // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2014. – V. 20. – № 2. – P. 656–667.
14. Оптимизация параметров неорганического агента управления профилем на основе силиката натрия для эффективного вытеснения нефти из коллекторов с высокой минерализацией / Нажису, В.И. Ерофеев, С. Лу, Ч. Тянь, Л. Чжан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 11. – P. 59–68.
15. The research and applications of remaining oil potential tapping in high watered stage for heavy oil reservoir in Bohai / J. Zhang, Z. Liu, L. Wang, Z. Fang, J. Deng // *Journal of Geoscience and Environment Protection*. – 2018. – V. 6. – № 9. – P. 10–21.
16. Effects of the charge ions strength on the swelling of organic-inorganic nanogels / Q. Yu, X. Lu, J. Wang, Q. Guo, L. Niu // *Bulletin of Korean Chemistry Society*. – 2016. – V. 37. – № 7. – P. 1124–1131.
17. Analysis of dynamic imbibition effect of surfactant in microcracks of reservoir at high temperature and low permeability / K. Xie, X. Lu, H. Pan, D. Han, G. Hu, J. Zhang, B. Zhang, B. Cao // *SPE Production & Operations*. – 2018. – V. 33. – № 3. – P. 596–606.
18. Wu S., Yan J., Zhao F. Effect of adsorption and deposition of asphaltines in crude oil on wettability and permeability of reservoir rocks // *Shiyou Daxue Xuebao*. – 2004. – V. 28. – № 1. – P. 36–40.
19. Effect of wettability on recovery and relative permeability / Z. Liu, Q. Zheng, Z. Tang, G. Zhang // *Oil & Gas Geology*. – 2000. – V. 21. – № 2. – P. 148–150.
20. Microscopic modelling of polymer flooding relative permeability curve and its influence factors / J. Li, H. Jiang, M. Chen, H. Gao // *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*. – 2009. – V. 31. – № 4. – P. 122–126.
21. Variation law of reservoir parameters during water flooding in Dagang oilfield / L. Guo, Y. Wang, W. Liu, C. Zhang, W. Liu, T. Liu // *Petroleum geology & experiment*. – 2006. – V. 28. – № 1. – P. 86–91.

Поступила 19.08.2020 г.

#### Информация об авторах

**Се Кун**, доктор технических наук, доцент Института нефтегазового дела Северо-Восточного нефтяного университета.

**Мэй Цзе**, магистр ключевой лаборатории Министерства образования по увеличению нефтеотдачи пластов Института нефтегазового дела Северо-Восточного нефтяного университета.

**Нажису**, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ерофеев В.И.**, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Су Ченг**, магистр ключевой лаборатории Министерства образования по увеличению нефтеотдачи пластов Института нефтегазового дела Северо-Восточного нефтяного университета.

**Цзян Вэйдун**, инженер Отдела разработки и производства.

**Лу Сянго**, доктор технических наук, профессор Института нефтегазового дела Северо-Восточного нефтяного университета.

UDC 622.276

## STUDY ON SEEPAGE CHARACTERISTICS AND DISPLACEMENT EFFICIENCY OF WATER FLOODING IN OFFSHORE HEAVY OIL RESERVOIR

Xie Kun<sup>1</sup>,  
xiekun725@163.com

Mei Jie<sup>1</sup>,  
sichuandexuesheng@163.com

Narisu<sup>2</sup>,  
Narisu33@126.com

Vladimir I. Erofeev<sup>2</sup>,  
erofeevvi@mail.ru

Su Cheng<sup>1</sup>,  
380500259@qq.com

Jiang Weidong<sup>3</sup>,  
1543284194@qq.com

Lu Xiangguo<sup>1</sup>,  
877459272@qq.com

<sup>1</sup> Northeast Petroleum University,  
199, Razvitiya street, Daqing, 163000, China.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>3</sup> CNOOC Ltd.,  
Beijing, 100010, China.

**The relevance.** Compared with conventional reservoir, offshore heavy oil reservoir faced the problem of lower water flooding recovery. It is helpful to improve the water flooding recovery of heavy oil reservoir if we have more knowledge about seepage characteristics of water and oil.

**The main aim** of the research is to investigate the change rule of seepage characteristics of water phase and oil phase in offshore heavy oil reservoir, which is helpful to the decision of field construction and can provide guidance for numerical simulation.

**Methods.** The reservoir geological characteristics, fluid properties and field construction technology of the destination offshore heavy oil reservoir in Bohai Oilfield were taken into consideration. The impact of core permeability, injection water washout and crude oil viscosity on relative permeability curve and displacement efficiency of water flooding were studied, through core displacement experiment using displacement method of unsteady state. The change of core inside structure is presented by core CT scanning and mercury pressure test.

**Results.** With the increase of core permeability, water phase relative permeability increases, the swept volume of water phase becomes bigger, two-phase flow span gets wider, and ultimate recovery enhances. The function of «cleaning» and «erosion» that water washout exerts on core pore structure would enlarge the pore throat radius, increasing core permeability, and its influence on relative permeability curve and displacement efficiency is the same as the influence of permeability increase. With the crude oil viscosity increasing, mobility control ability of water gets weaker in the process of water flooding, displacement phase viscous fingering phenomenon aggravates, the swept volume of water phase becomes smaller, two-phase flow span gets narrower, and ultimate recovery decreases.

### Key words:

Offshore oilfield, heavy oil reservoir, water flooding, relative permeability, unsteady state method, oil recovery.

This work was supported by the Natural Science Foundation of China (No. 51574086, 51834005), National science and technology major projects (2016 ZX05058-003-010), Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (BX20190065).

### REFERENCES

1. Cao W., Xie K., Lu X., Liu Y., Zhang Y. Effect of profile-control oil-displacement agent on increasing oil recovery and its mechanism. *Fuel*, 2019, vol. 237, pp. 1151–1160.
2. Dai C., Yang S., Wu X., Liu Y., Peng D., Wang K., Wu Y. Investigation on Polymer Reutilization Mechanism of Salt-Tolerant Modified Starch on Offshore Oilfield. *Energy & Fuels*, 2016, vol. 30, no. 7, pp. 5585–5592.
3. Xie K., Cao B., Lu X., Jiang W., Zhang Y., Li Q., Song K., Liu J., Wang W., Lv J., Na R. Matching between the diameter of the aggregates of hydrophobically associating polymers and reservoir pore-throat size during polymer flooding in an offshore oilfield. *Journal of petroleum science and engineering*, 2019, vol. 177, pp. 558–569.
4. Narisu, Erofeev V.I., Lv J., Wang W. Study on filtration and rheological properties of polymer gel to improve oil recovery. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 147–157. In Rus.
5. Yu Y., Chang Z., Qi Y., Feng D. Research on new technology for offshore heavy oil thermal recovery with rod pumping. *Journal of Petroleum Exploration & Production Technology*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 947–955.
6. Huang S., Cao M., Cheng L. Experimental study on the mechanism of enhanced oil recovery by multi-thermal fluid in offshore heavy oil. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2018, vol. 122, pp. 1074–1084.
7. Kim C., Lee J. Experimental study on the variation of relative permeability due to clay minerals in low salinity water-flooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 157, pp. 292–304.
8. Su W., Liu Y., Gao Z., Yang L., Yang R., Mcharo W., Tang R. Relative permeability variations during low salinity water flooding in carbonate rocks with different mineral compositions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2020, vol. 41, no. 2, pp. 227–234.
9. Narisu, Erofeev V.I., Lu X., Lv J., Wang X., Zhang L. The effect of layer water mineralization on physical chemical and filtration characteristics of polymeric solutions and gels for increasing oil recovery. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 136–145. In Rus.
10. Gong P., Liu B., Zhang J., Lv Z., Zhang G. Classification study on relative permeability curves. *World Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 723–737.

11. Liu A., Wang K., Zang J., Du F., Zhou A. Relative permeability of gas for unconventional reservoirs. *Transport in Porous Media*, 2018, vol. 124, no. 1, pp. 289–307.
12. Zolotukhin A., Yazynina I., Shelyago E. Relative permeability hysteresis for oil-water system in hydrophilic rocks. *Oil Industry Journal*, 2016, no. 3, pp. 78–80.
13. Wang J., Huiqing L. A novel model and sensitivity analysis for viscoelastic polymer flooding in offshore oilfield. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 656–667.
14. Narisu, Erofeev V.I., Lu X., Tian Z., Zhang L. Optimization of parameters of inorganic profile control agent on the basis of sodium silicate for effective oil displacement from high salinity reservoir. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 59–68. In Rus.
15. Zhang J., Liu Z., Wang L., Fang Z., Deng J. The research and applications of remaining oil potential tapping in high watered stage for heavy oil reservoir in Bohai. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2018, vol. 6, no. 9, pp. 10–21.
16. Yu Q., Lu X., Wang J., Guo Q., Niu L. Effects of the charge ions strength on the swelling of organic-inorganic nanogels. *Bulletin of Korean Chemistry Society*, 2016, vol. 37, no. 7, pp. 1124–1131.
17. Xie K., Lu X., Pan H., Han D., Hu G., Zhang J., Zhang, B., Cao B. Analysis of dynamic imbibition effect of surfactant in microcracks of reservoir at high temperature and low permeability. *SPE Production & Operations*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 596–606.
18. Wu S., Yan J., Zhao F. Effect of adsorption and deposition of asphaltines in crude oil on wettability and permeability of reservoir rocks. *Shiyou Daxue Xuebao*, 2004, vol. 28, no. 1, pp. 36–40.
19. Liu Z., Zheng Q., Tang Z., Zhang G. Effect of wettability on recovery and relative permeability. *Oil & Gas Geology*, vol. 21, no. 2, pp. 148–150.
20. Li J., Jiang H., Chen M., Gao H. Microscopic modelling of polymer flooding relative permeability curve and its influence factors. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 122–126.
21. Guo L., Wang Y., Liu W., Zhang C., Liu W., Liu T. Variation law of reservoir parameters during water flooding in Dagang oilfield. *Petroleum geology & experiment*, 2006, vol. 28, no. 1, pp. 86–91.

Received: 19 August 2020.

#### Information about the authors

**Xie Kun**, Dr. Sc., associate professor, Northeast Petroleum University.

**Mei Jie**, graduate student, Northeast Petroleum University.

**Narisu**, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vladimir I. Erofeev**, Dr. Sc., academician of RANS, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Su Cheng**, graduate student, Northeast Petroleum University.

**Jiang Weidong**, senior engineer, CNOOC Ltd.

**Lu Xiangguo**, Dr. Sc., professor, Northeast Petroleum University.

УДК 552.513:552.144:551.3.051

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕСЧАНЫХ ПЛАСТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ ЯКОВЛЕВСКОЙ СВИТЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЛОДОЧНОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Черданцева Дарья Андреевна<sup>1</sup>,  
cherdantsevada@tomsknpi.ru

Кравченко Григорий Геннадьевич<sup>1</sup>,  
kravchenkog@tomsknpi.ru

Краснощекова Любовь Афанасьевна<sup>2</sup>,  
krasnl@tpu.ru

<sup>1</sup> Акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа», Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью расширения ресурсного потенциала Российской Федерации за счет прироста месторождений углеводородов. На сегодняшний день нефть относится к полезным ископаемым, достигнутые уровни добычи которых недостаточно обеспечены запасами разрабатываемых месторождений. Подробное изучение строения продуктивных песчаных пластов-коллекторов в пределах Ванкорской группы месторождений на севере Красноярского края в перспективе даст возможность для прогноза и открытия новых залежей углеводородов в нижнемеловых отложениях Сибири.

**Цель:** определить условия формирования продуктивных песчаных пластов по данным изучения кернового материала, изучить причины неоднородности сформированных отложений и выявить их характерные признаки для последующего прогноза нижнемеловых нефтеносных отложений на территории Красноярского края.

**Объект:** продуктивные песчаные пласты яковлевской свиты нижнего мела Лодочного нефтегазоконденсатного месторождения.

**Методы:** петрографический анализ шлифов, стадийный анализ, гранулометрический анализ, фациальный анализ, исследование фильтрационно-емкостных и петрофизических свойств пород.

**Результаты.** По данным петрографического анализа был изучен вещественный состав продуктивных песчаных отложений верхне- и нижнеяковлевской подсвит Лодочного месторождения, дана их сравнительная характеристика. Определена степень влияния постседиментационных процессов на формирование современного облика изучаемых отложений. Предложена фациальная модель, наиболее точно описывающая условия формирования продуктивных пластов. Установлено влияние условий осадконакопления в комплексе с последующими постседиментационными преобразованиями пород на фильтрационно-емкостные параметры песчаников. Объяснены причины наличия карбонатизированных прослоев во флювиальных отложениях. Сделаны выводы о возможности прогноза продуктивности отложений яковлевской свиты, накопленных в различных фациальных обстановках.

### Ключевые слова:

Песчаник, диагенез, яковлевская свита, аллювиальная обстановка, Красноярский край.

### Введение

Лодочное нефтегазоконденсатное месторождение входит в Ванкорскую группу месторождений углеводородов и административно расположено в Туруханском районе Красноярского края, с точки зрения нефтегазогеологического районирования относится к Большехэтскому нефтегазоносному району Пур-Тазовской нефтегазоносной области. Север Красноярского края является перспективной территорией для наращивания нефтегазового потенциала РФ. Изучаемое месторождение многопластовое, основные запасы углеводородов приурочены к нижнемеловым отложениям яковлевской, малохетской, суходудинской и нижнехетской свит. Яковлевская свита по своему литологическому составу разделена на две подсвиты – нижнюю угленосную и верхнюю песчано-глинистую.

Целью исследования являлось установление условий формирования и анализ причин неоднородности свойств терригенных пластов-коллекторов вышеуказанной сви-

ты для последующего прогноза и моделирования особенностей строения песчаных тел на месторождении.

В работах отечественных [1, 2] и зарубежных [3, 4] седиментологов, связанных с исследованием терригенных пород, применяется комплексное изучение вещественного состава, условий формирования и диагенетических преобразований пород [5–7]. Все чаще эти исследования дополняются прецизионными методами: электронной микроскопией [8, 9], рентгенофазовыми исследованиями [10].

При проведении петрографических исследований в каждом конкретном случае наблюдению доступны лишь конечные или промежуточные продукты полистадийного литогенеза [11]. Для раскрытия информации о стадиях и условиях формирования отложений, зашифрованной в образцах, необходимо путём снятия вторичных наслоений определить первичные признаки осадка, из которого была сформирована порода [12]. При этом через изучение признаков последовательно-

сти этапов формирования, изменения и исчезновения в породе минеральных и структурно-текстурных парагенезисов минералов, с учётом всех сопутствующих геологических событий на исследуемой территории, возможно обоснование неоднородности строения продуктивных пластов и, как следствие, получение данных для построения максимально приближенных к реальности моделей месторождения.

В статье приведены результаты комплексного изучения песчаных пластов яковлевской свиты от макро-скопического исследования керна до петрографического анализа шлифов. Авторами предпринята попытка реконструкции последовательности процессов, оказавших влияние на исследуемые породы на разных стадиях их формирования и трансформации через проведение морфологической и генетической типизации слоистых текстур и изучение вещественного состава пород.

#### Объекты и методы исследований

Объектом настоящих исследований выступили песчаные пласты яковлевской свиты, вскрытые скважинами 9, 10, 13, 14, 128 Лодочного месторождения. Всего было изучено 1375 м кернового материала и 305 покрашенных синей эпоксидной смолой шлифов.

Фациальный анализ керна выполнялся по стандартным методикам, основу которых составляет детальное макро-скопическое изучение особенностей строения пород в керновом материале [13–15].

При проведении фациального анализа учитывались следующие основные признаки осадочных пород:

1. Структурные и текстурные особенности их строения:
  - осадочные структуры, отраженные в гранулометрическом составе (размер и форма зёрен, степень их сортировки и окатанность);
  - осадочные текстуры и типы слоистости – горизонтальная, одно- и разнонаправленная косая, волнистая и их смешанные типы, градиционная, троговая, линзовидная и т. д., включая также разнообразные неслоистые текстуры конседиментационных деформаций, оползания, внедрения, шаровые и подушечные, биотурбационные и др.
2. Палеонтологические признаки, такие как включения флоры и фауны, следы жизнедеятельности (ихнофациальный анализ).
3. Совокупность геохимических признаков (присутствие минералов-индикаторов: доломита и кальцита, сульфидов железа, глауконита, глинистых минералов и др.).

По совокупности вышеуказанных признаков возможно установление темпов седиментации, характерных для изучаемых пород.

Проведение фациального анализа состояло из двух крупных этапов: предварительного и аналитического. В процессе предварительного этапа авторы изучили особенности тектонического строения, стратиграфического расчленения и истории геологического развития месторождения. Результатом изучения стало определение основных предпосылок, составляющих так называемый «фациальный фон».

Аналитический этап включал в себя проведение самого фациального анализа, а именно:

- 1) послойное литологическое описание песчаных пород с использованием комплекса макро- и микроскопических анализов, а также различных химических и физических методов.
- 2) выделение «реперных» фаций, т. е. таких отложений, фациальная интерпретация которых однозначна, например, углей, почв, прослоев с органическими биоценозами, характерными только для определенных обстановок.
- 3) диагностика оставшихся отложений с выделением фаций путём анализа взаимоотношений различных литотипов, как по разрезу, так и по площади. Наиболее важным элементом этой стадии является выбор концептуальной модели, описывающей обстановки осадконакопления всех изучаемых отложений.

Петрографическое изучение включало определение структурно-текстурных характеристик, количественный гранулометрический и минералогический анализ в шлифах алевро-песчаных пород на поляризационном микроскопе Olympus BX53 по методике Черникова (1970). Для гранулометрического анализа измерялись длины случайных срезов для 200 зёрен, последовательно пересечённых микрометренной линейкой окуляра микроскопа. Фракционный состав пород рассчитывался для фракций с соотношением границ равным  $1,259^{(10/10)}$  с последующим пересчётом полученных содержаний в каждой фракции для устранения эффекта случайного срезания зёрен поверхностью шлифа [16]. При выделении гранулометрических песчаных фракций использовалась классификация, приведенная в Систематике и классификации осадочных пород (1998). Одновременно с гранулометрическим определением размеров зёрен проводилось определение состава терригенных компонентов [17], составляющих скелет породы, а именно: кварца, полевых шпатов и обломков различных пород, включая слюды. Название породы по составу приводилось по классификации В.Н. Шванова (1987). Помимо порообразующих минералов, определялся тип цементации и характер распространения цемента, поровое пространство характеризовалось по размерам, формам и закономерностям распределения. По результатам изучения делались выводы о вторичных изменениях, проявленных в породах.

#### Результаты и их обсуждение Фациальные условия

Отложения нижнего отдела меловой системы в пределах Лодочного месторождения вскрыты 10 скважинами и представлены нижнехетской, сухудинской, малохетской и яковлевской свитами. Последняя по своему литологическому составу делится на верхнюю песчано-глинистую и нижнюю угленосную. К верхней подсвите отнесены продуктивные пласты ВЯк-I, ВЯк-V, ВЯк-VIII-IX, ВЯк-X, ВЯк-XI, ВЯк-XV, ВЯк-XVII; к нижней – Як-I-II, Як-III, Як-IV, Як-V, Як-VI, Як-VII, Як-VIII.

Изученный авторами керновый материал из отложений яковлевской свиты представлен переслаивани-



ем светло-серых глинистых и известковистых средне-сцементированных песчаников (с полосчатым характером нефтенасыщения) с серыми песчано-глинистыми алевролитами и темно-серыми аргиллитами. Отмечаются единичные пропластки галечных песчаных пестроокрашенных гравелитов и углей. Основная текстура песчаников слоистая, для верхнеяковлевских отложений характерна слоистость волнистая и косоволнистая, для нижнеяковлевских – косая однонаправленная, подчеркнутая намывами углефицированного детрита, сидеритом; реже отмечаются биотурбационная и интракластовая текстуры. Для аргиллитов наиболее характерна линзовидная слоистость, подчеркнутая песчаным материалом; в качестве подчинённых встречаются оползневая, брекчиевидная, пятнистая и прожилковая текстуры.

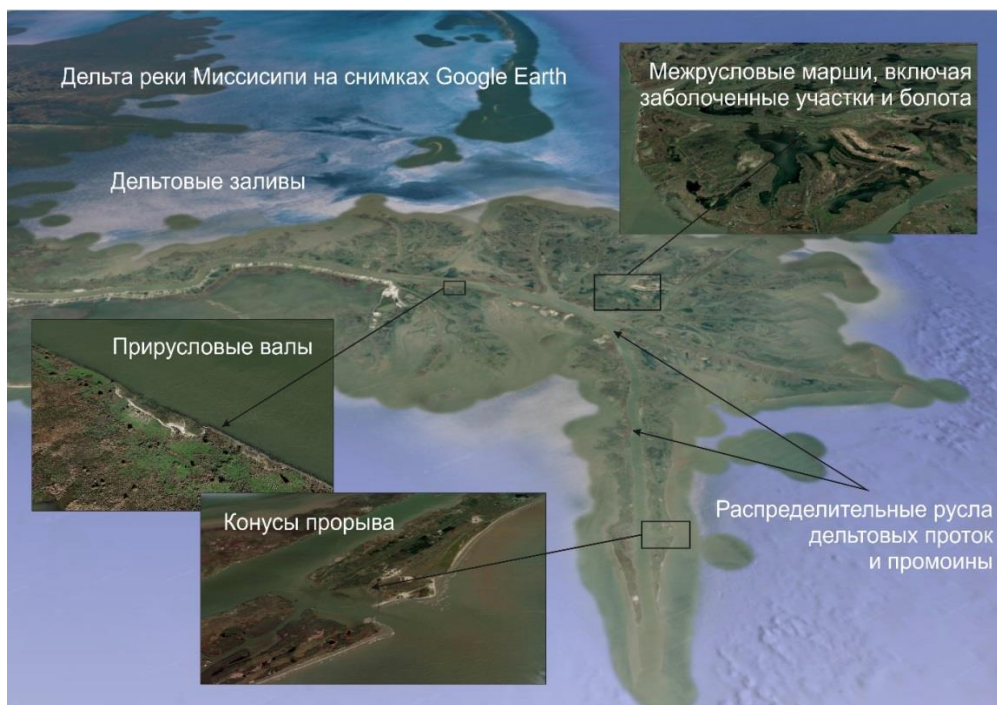
В отложениях пласта Як-IV отмечается наличие сидеритовых и кальцитовых конкреций размером до 16 см в диаметре. По всему разрезу яковлевской свиты наблюдается неравномерная наложенная вторичная карбонатизация с преимущественно пятнистым и полосчато-пятнистым характером распределения. Интракласты, отмеченные в песчаных прослоях, по составу в большинстве случаев глинистые, реже сидеритовые. Часто в породах встречаются намывы углефицированного растительного детрита от тонких прослоев, подчеркивающих косую слоистость, до крупных (размером более 5 см) обрывков удлиненной формы.

Проведение морфологической типизации слоистости, по Л.Н. Ботвинкиной [18], с последующей генетической типизацией текстур позволили выделить основные фациальные обстановки, характерные для

изучаемой территории на момент формирования яковлевской свиты. Каждая выделенная фация характеризуется не одним типом слоистости, а определённым комплексом слоистых текстур.

Для верхнеяковлевских отложений характерно наличие в песчаниках косоволнистой (мульдообразной) и линзовидно-косо-волнистой слоистости, что, наряду с преимущественно хорошей сортировкой материала, фиксирует высокую гидродинамическую активность среды осадкообразования. В частности, проявление волнистой слоистости говорит об активном волновом воздействии. Верхнеяковлевские отложения интенсивно биотурбированы, что однозначно указывает на значимую роль морской или осолонённой воды в ходе их седиментации, а присутствие в них отпечатков флоры и остатков корней – об аэральном или субаэральном условиях (близости континента).

Преобладание в разрезе нижнеяковлевской подсвиты косой плоскопараллельной и косой однонаправленной слоистости также свидетельствует об активной динамике среды, однако в этом случае она была связана преимущественно с однонаправленными потоками. Нередко встречающиеся в песчаниках скопления интракластов являются признаком частичного размыва нижележащих слабосцементированных отложений. Широкое распространение, по сравнению с верхнеяковлевской подсвитой, угольных прослоев, отпечатков флоры, остатков корней и углефицированного растительного детрита интерпретируется как результат более аэральных условий. Сортировка материала преимущественно хорошая и средняя, реже встречается плохая.



**Рис. 1.** Космический снимок (Google Earth) дельты реки Миссисипи. Современный аналог для принятой фациальной модели яковлевской свиты – дельта с преобладанием речных процессов и значительным выносом обломочного материала

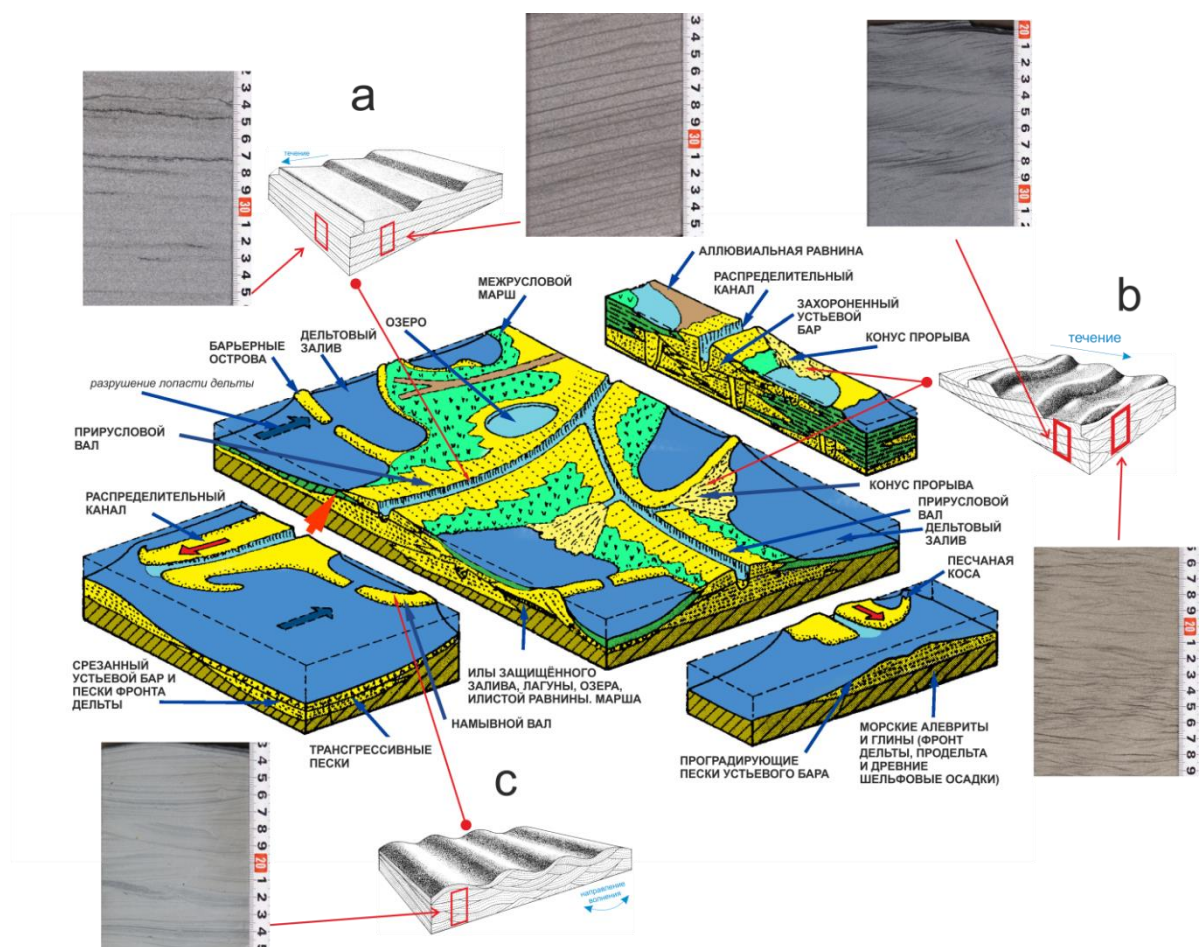
**Fig. 1.** The Mississippi River Delta satellite image (Google Earth). A modern analogue for the Yakovlevskaya suite facies model is the delta with the river processes predominance and clastic material significant removal



По результатам проведённого авторами фациального анализа установлено, что яковлевская свита представляет собой довольно однородную в фациальном отношении толщу: это набор фаций дельтовой системы (возможно, не одной) флювиального типа, отложение которых происходило в диапазоне от суб-азральной до субаквальной части дельтовой равнины. Периодическое перемещение территории из суб-азральной части дельтовой равнины в субаквальную и обратно происходило в условиях проградации дельты на фоне незначительных колебаний относительного уровня моря. Существенно более глинистый и углистый состав песчаных пластов верхней подесвиты –

результат замедления проградации дельты и выравнивания территории и, как следствие, проникновения морских вод с последующим формированием сильно биотурбированных прослоев. На рис. 1 приведён пример современного аналога для выделенных фациальных обстановок осадконакопления, существующих на описываемой территории в период формирования яковлевской свиты.

Ниже рассмотрены краткие характеристики основных фаций, выделенных по керновому материалу яковлевской свиты из скважин Лодочного месторождения (рис. 2, 3).



**Рис. 2.** Концептуальная схема дельты с преобладанием речных процессов (по G. Einsele [19], с дополнениями Е.Ю. Барабошкина [13], с изменениями авторов). Блок-диаграммы косой слоистости [14], демонстрирующие внутреннее строение песчаных пород с: а) косой (плоскопараллельной, табулярной) слоистостью, образованной при миграции ряби течения с прямолинейными гребнями; на фрагментах фотографий керна – песчаники фации русла распределительного канала; б) косой слоистостью, образованной при миграции мелкой волнистой ряби; на фрагментах фотографий керна – песчаники фации конуса прорыва; в) ассиметричной рябью волнения; на фрагменте фотографии керна – песчаник фации намывного вала в дельтовом заливе, в песчанике отмечается разнонаправленная косая слоистость ряби волнения с перекрещиванием, выклиниванием и срезанием косых слоев

**Fig. 2.** Conceptual scheme of the delta with the river processes predominance (according to G. Einsele [19], with additions by E.Yu. Baraboshkin [13], with changes by the authors). Bedded structure block-diagrams [14], showing the sandstone layers internal structure with: a) diagonal stratification (plane-parallel, tabular) formed during migration of the current ripples with straight ripple crest; the core photo fragments show sandstones from the distributive channel; b) oblique stratification formed during the small wavy ripples migration; the core photo fragments show sandstones from the crevasse splay; c) asymmetric wave lamination; the core photofragment shows the sandstone from the natural levee facies in the delta bay; in the sandstone there is multidirectional oblique ripple stratification with crossing, pinching and cutting of oblique layers

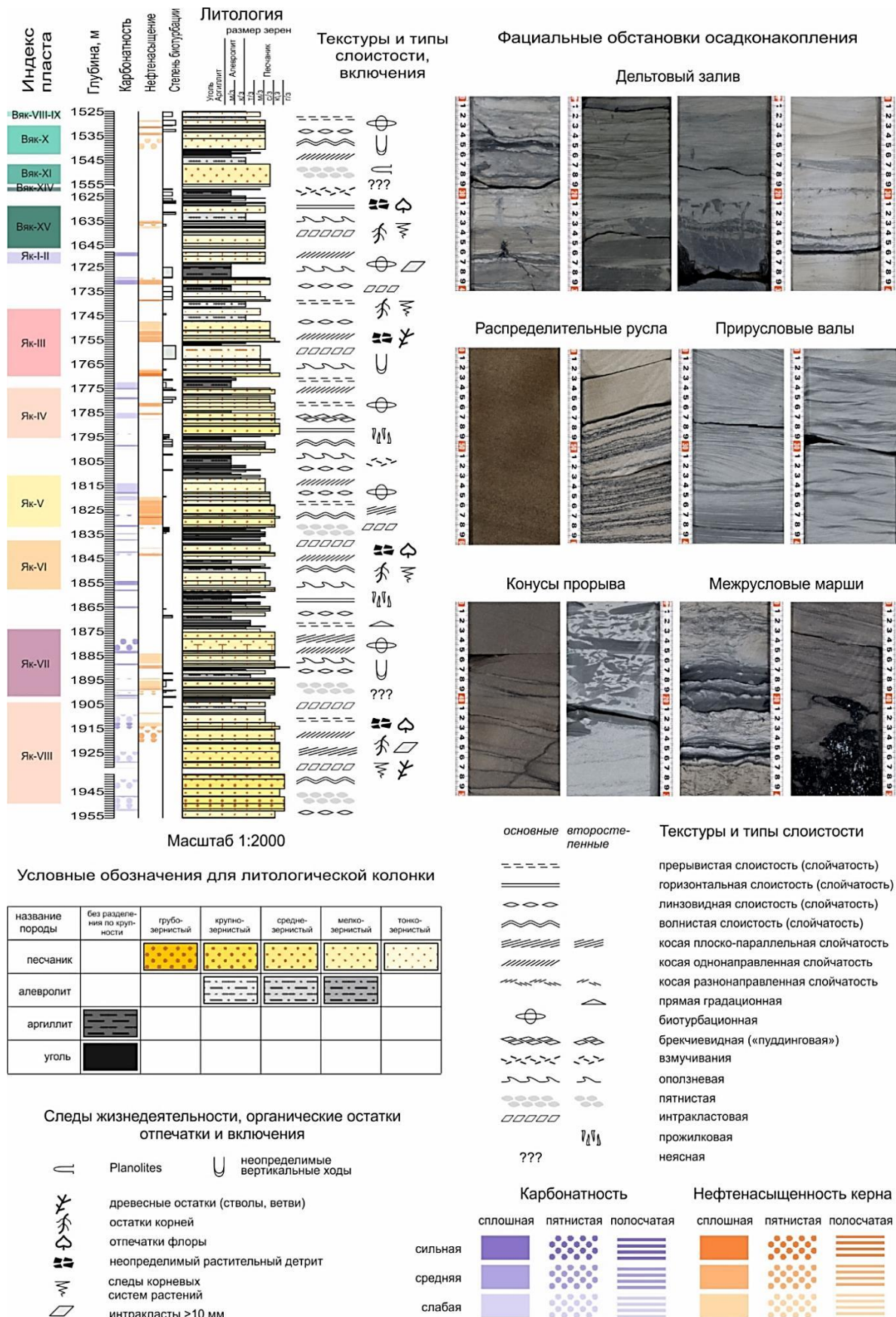


Рис. 3. Литологическая колонка и основные типы слоистых текстур и фаций по разрезу яковлевской свиты. Скважина № 9 Лодочного месторождения

Fig. 3. Lithological column and the layered structures main types with facies along the Yakovlevskaya suite section, well No. 9 of the Lodochnoe oil and gas field



Фация распределительных русел дельтовых проток и промоин представлена мелко- и среднезернистыми песчаниками, толщина пропластков которых достигает 10 м. Наиболее распространённый тип слоистости – косая однонаправленная, участками встречается её разновидность – плоскопараллельная (рис. 2, а), что указывает на формирование отложений в условиях однонаправленного потока. Слоистость не выдержана, как по форме и толщине слоёв, так и по мощности серий, что дополнительно свидетельствует о частой смене скоростей руслового потока, в отличие от гораздо более однородных потоков рек меандрирующего типа. Встречаются глинистые интракласты и обломки углефицированной древесины, фиксирующие поверхности врезания (русло-вые врезы), особенно характерные для нижней под-свиты. Песчаники фации русел обладают наилучшими коллекторскими свойствами среди всех песчаных отложений других фаций, выделенных авторами в яковлевской свите на месторождении.

Фация прирусловых валов представлена мелко-тонкозернистыми песчаниками, часто алевритовыми и глинистыми, или тонким ритмичным переслаиванием этих пород. Встречаются ихнофоссилии (субак-вальное накопление) и углефицированные корни и следы их присутствия – обычно в верхней части раз-резов прирусловых валов (азральная обстановка).

Фация конусов прорыва сложена тонко-мелкозернистыми песчаниками с однонаправленной косой слоистостью (в поперечных срезах она может иметь вид троговой или мульдобразной), нередко с подчёркнутой обильными глинистыми намывами восходящей рябью течения, что является признаком большого количества влекомого потоком обломочно-го материала (рис. 2, б). Для конусов прорыва харак-терна ассоциация с межрусловыми маршами и дель-товым заливом. Мощность конусов прорыва – от не-

скольких десятков сантиметров до первых метров. Песчаники этой фации также могут быть хорошими коллекторами для УВ.

Фация межрусловых маршей содержит в основном глинистые отложения, нередко встречается их пере-слаивание с песчаниками конусов прорыва. Наличие прослоев с ихнофоссилиями указывает на подтопле-ние территории солоноватыми водами из-за близости моря. Также отмечаются тонкие прослои углей или углистых аргиллитов, которые фиксируют периоды заболачивания территории. Иногда в алевrolитах наблюдаются подушечные текстуры – результат про-давливания песчаным осадком менее плотного слабо литифицированного алевритового ила, что интерпре-тируется как признак аквальных условий.

Фация дельтовых заливов представлена неравно-мерным переслаиванием песчано-глинистых пород, в которых фиксируются многочисленные ихнофосси-лии. На этапе формирования описываемой фации на изучаемой территории, по-видимому, преобладали субаквальные условия с опреснением, о чём свиде-тельствует широкое распространение ихнофоссилий *Teichichnus*. Встречаются прослои мелкозернистого песчаника с разнонаправленной косой слоистостью ряби волнения, которые также могут являться кол-лекторами для УВ (рис. 2, с).

#### Вещественный состав и постседиментационные преобразования отложений

В результате петрографического анализа образцов были подсчитаны обобщённые литологические ха-рактеристики для песчаников нижне- и верхнеяко-влевской подсвит, полученные данные отражены в таблице ниже. По соотношениям основных пороодо-образующих компонентов песчаные породы яковле-вской свиты относятся к мезомиктовым песчаникам, аркозам и кварцевым грауваккам (рис. 4).

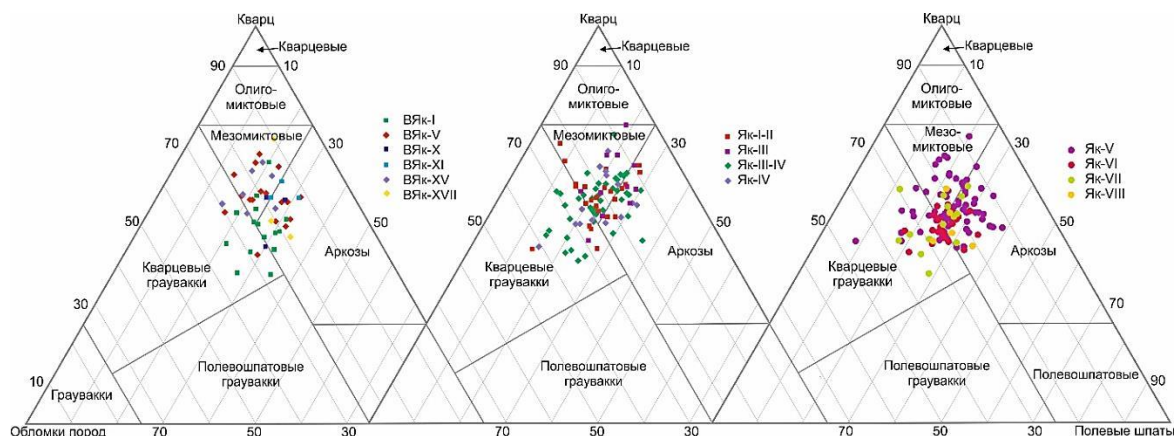


Рис. 4. Состав песчаных пород верхне- и нижнеяковлевской подсвит на диаграмме В.Н. Шванова (1987)

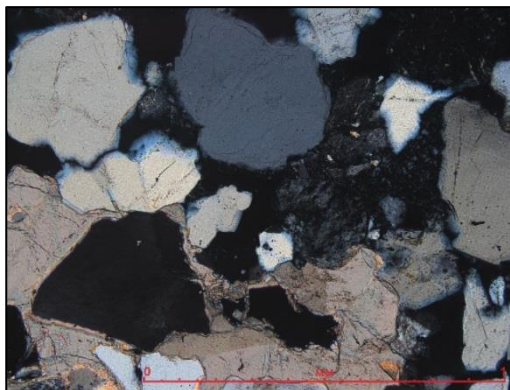
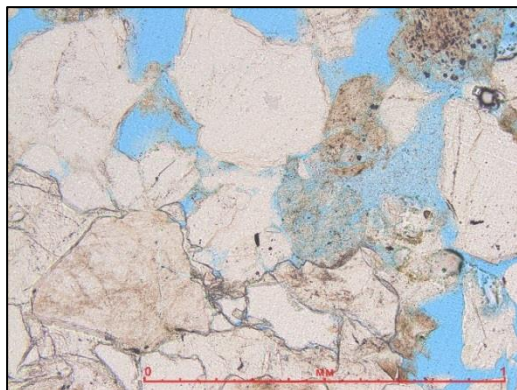
Fig. 4. Sandstone composition diagrams according to V.N. Shvanov (1987), sandstones from Upper and Ya- kovlevskaya suite oil-bearing layers

Основная микротекстура пород ориентированная, обусловленная субпараллельным расположением удлиненных обломков и чешуек слюд, подчёркнутая послойным обогащением породы органическим ве- ществом, рудными и акцессорными минералами. По-

мимо основной ориентированной микротекстуры в песчаниках отмечены:

- неяснослоистая текстура, сформированная за счёт неравномерного послойного распределения карбо- натного цемента и карбонатно-глинистых прослоев;

- яснослоистая текстура, возникающая за счёт прослоев, обогащенных глауконитом, хлоритом, сидеритом, слюдами, органическим веществом и рудными минералами;
- пятнистая микротекстура, связанная с неравномерным распределением карбонатного цемента (рис. 5).



**Рис. 5.** Песчаник с пятнистой микротекстурой среднезернистый мезомиктовый с коррозионно-поровым карбонатным и поровым каолининовым цементом. Фотоснимок шлифа № 1786-19 скв. № 9, глубина отбора 1941,2 м, пласт Як-VIII. Николи параллельны и скрещены

**Fig. 5.** Medium-grained mesomictic sandstone with spotty microtexture and porous corrosion carbonate and kaolinite cement. Thin section photo, sample No. 1786-19, well No. 9, sampling depth 1941,2 m, layer Yak-VIII. In plane-polarized light on left, cross-polarized light on right

Кварцевые зёрна имеют разную степень окатанности, фрагментарно отмечается регенерация минерала и его разрастание за счёт каёмки в свободном поровом пространстве. Калиевые полевые шпаты подвержены умеренной пелитизации и каолинитизации, плагиоклазы слабо серицитизированы с фрагментарным проявлением альбитизации. При растворении полевых шпатов формируется внутризёрновая микропористость.

Обломки пород в песчаниках из верхне- и нижнеяковлевской подсвит имеют гетерогенное происхождение и представлены, преимущественно, кварцитами, кварц-серицитовыми и глинистыми сланцами, обломками кремнистых и углисто-слюдисто-кремнистых пород, метавулканитами основного состава. Различия в составе обломков пород изучаемых отложений проявляется незначительно: в верхнеяковлевских песчаниках единично фиксируются, помимо указанных выше, обломки карбонатных пород, в нижнеяковлевских – обломки гранитоидов, в единичных случаях алевролитов.

Слюды в породах гидратируются, по биотиту фиксируется развитие сидерита и хлорита, вплоть до полного его замещения.

Из аксессуарных минералов встречаются рутил, циркон, турмалин, сфен, гранат, апатит, минералы группы эпидота, хромит и магнетит. Из аутигенных образований наблюдаются лейкоксен, глауконит и пирит, карбонатные и глинистые минералы.

Механическое уплотнение в изучаемых песчаниках проявлено слабо, на что указывают преобладающие типы контактов зёрен – точечные и линейные, реже отмечаются конформные и инкорпорационные. Последние по [20] проявляются при повышении нагрузки вышележащих толщ пород на терригенный материал в присутствии водно-флюидной фазы на стадии катагенеза и приводят к возникновению минеральных агрегатов с минимальными зазорами и вы-

пукло-вогнутыми и взаимопроникающими контактами между зёрнами.

Распределение цемента в породах неравномерное: в одних участках шлифа цементы полиминеральные, сложены глинистыми минералами, карбонатами, сульфидами; в других участках перечисленные минералы проявляются раздельно и формируют мономинеральный цемент.

Глинистые цементы порового и пленочно-порового типа представлены чешуйками гидрослюды, хлоритом и каолинитом. Количественная оценка содержания глинистых минералов проводилась при петрографическом изучении пород в шлифах (таблица). Гидрослюды развиты преимущественно в виде мелкочешуйчато-волокнистых агрегатов, хлорит образует цемент порового выполнения.

Каолинит занимает поры между обломками и в большинстве случаев имеет хорошо выраженную мелко-среднекристаллическую структуру. Локально наблюдается перекристаллизация первичного гидрослюдистого цемента с образованием чешуйчатого каолининового агрегата. В межпакетных промежутках в каолините распространены микропоры. Образование каолинита в песчаниках можно связать с эпигенетическими процессами, обусловленными изменением гидрогеологического режима. В результате чего в пласты проникали чужеродные по химизму воды, контактировавшие с нефтяными залежами и твёрдыми битумами. Повышенная кислотность вод стимулировала развитие аутигенного каолинита за счёт образования его кристаллических агрегатов в поровом пространстве из растворов, содержащих диффундировавшие ионы  $\text{Si}^{4+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  от минералов-доноров. Избирательная альбитизация и частичное растворение плагиоклазов привели к высвобождению ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{K}^{+}$ , и свободные ионы  $\text{Ca}^{2+}$  дополнили в поровом пространстве резерв для формирования аутигенных карбонатов.

**Таблица.** Сравнительная характеристика литологических параметров песчаных пластов верхне- и нижнеяковлевской подсвит

**Table.** Sandstones material composition comparative characteristics (samples from the Upper and Lower Yakovlevskaya subsuites)

Подсвита/Subsuite		Верхнеяковлевская Upper Yakovlevskaya	Нижнеяковлевская Lower Yakovlevskaya
Литология /Lithology			
Гранулометрические характеристики/Granulometric characteristics*			
Песчаные фракции, мм (распространённость в условных единицах) Sand fractions, mm (prevalence in conditional units)	тонкая close (0,05...0,10)	+	—
	мелкая fine (0,10...0,25)	+++	+++
	средняя medium (0,25...0,50)	+++	+++
	крупная coarse (0,50...1,00)	+	—
Средневзвешенный диаметр зёрен, мм Weighted average grain diameter, mm		<b>0,32</b> (0,06...0,57)	<b>0,24</b> (0,20...0,27)
Степень сортировки Sorting degree	очень хорошая very good	++	+
	хорошая/good	+++	+++
	средняя/medium	++	+++
	плохая/low	+	+
Вещественный состав/The material composition**			
Кварц/Quartz, %		<b>45,3</b> (33,2...57,5)	<b>37,9</b> (34,1...41,8)
Полевые шпаты/Feldspars, %		<b>14,9</b> (9,9...19,9)	<b>12,1</b> (7,6...16,5)
Среднее соотношение КПП/Плаггиоклазы K-feldspar/plagioclase average ratio		<b>62/38</b>	<b>60/40</b>
Обломки пород/Rock fragments, %		<b>10,1</b> (3,9...16,4)	<b>27,8</b> (10,9...17,0)
Слюды/Mica, %	Мусковит Muscovite	<b>1,3</b> (0,4...2,1)	<b>1,5</b> (0,9...2,1)
	Биотит Biotite	<b>0,4</b> (0,1...0,6)	<b>2,8</b> (1,2...4,5)
Аутигенные минералы (макс. содержание) Authigenic minerals (max. content), %	Глауконит Glauconite	<b>2,9</b> (0,4...5,4)	<b>2,1</b> (0,3...4,0)
	Лейкоксен Leucoxene	<b>1,4</b> (0,7...2,0)	<b>0,5</b> (0,2...0,8)
	Пирит Pyrite	<b>1,5</b> (0,1...2,9)	<b>4,7</b> (0,1...9,2)
Акцессорные минералы/Accessory minerals, %		<b>0,9</b> (0,1...1,6)	<b>1,3</b> (0,6...2,1)
Цемент Cement, %	Поровый и плёночно-поровый Pore and film-pore	Каолинит Kaolinite	<b>7,4</b> (4,4...10,5)
		Иллит/Illit	<b>1,3</b> (0,4...2,2)
		Хлорит/Chlorite	<b>2,9</b> (0,1...5,7)
	Коррозионно-поровый Corrosion-pore	Кальцит/Calcite	<b>до 13,1</b>
		Сидерит/Siderite	<b>до 24,3</b>
Органическое вещество/Organic matter, %		<b>1,4</b> (0,2...2,6)	<b>6,5</b> (0,4...12,6)
Пористость/Porosity, %		<b>11,8</b> (5,0...18,5)	<b>14,9</b> (12,3...17,6)

\*Здесь и далее полужирным шрифтом указаны средние (в скобках – минимальные и максимальные) значения;  
 \*\*Содержания в % от площади шлифа.

\* Here and below the average (in brackets – the minimum and maximum) values are given with bold font; \*\* Content in % of the thin section surface.

Коррозионно-поровый карбонатный цемент имеет неоднородное распределение, представлен сидеритом и кальцитом, реже доломитом. Сидерит встречается в виде микроконкреционных стяжений пелитоморфного сложения, выделений, мелкокристаллической сыпи и сфероцитов, конкреций. Кальцитовый цемент проявляется в отдельных изученных породах, при выполнении пространства между обломками образует поровый (рис. 6), реже базально-поровый тип цементации. Доломит в виде отдельных ромбовидных зерен развит незначительно.

Пиритовый цемент встречается постоянно. Преимущественно он состоит из скоплений тонких пылеватых зерен, фрагментарно встречается псевдомонотипный цемент базально-порового типа.

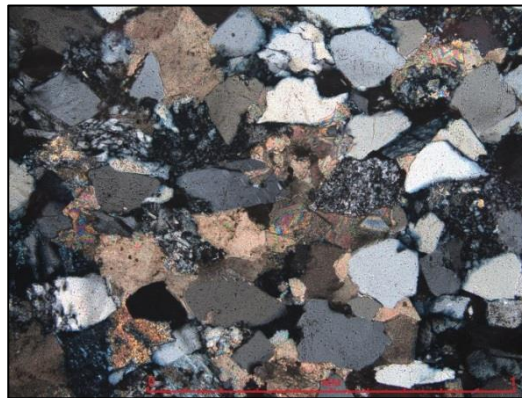
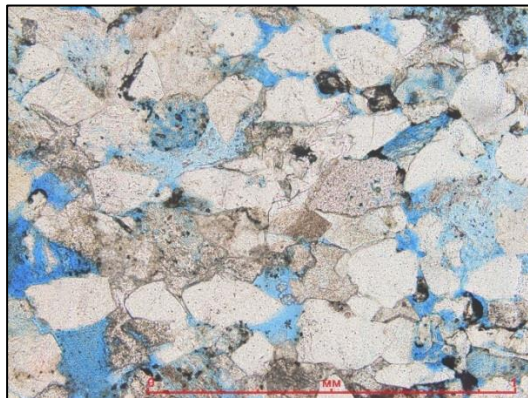
Формирование карбонатного цемента с пятнистым распределением значительно снижает пористость и проницаемость песчаников, поскольку в таких участках пород пустоты (поры, трещины, соединительные каналы) запечатываются карбонатным веществом, что приводит к уменьшению их полезной емкости. Механизм вторичной карбонизации аллювиально-дельтовых песчаных осадков, по-видимому, может быть связан с потерей CO<sub>2</sub> в процессе его миграции при отжиге поровых растворов и последующей «вентиляции» из глин в пески, а затем в воду. Свободная углекислота совместно с растворами бикарбонатов кальция, магния и железа фильтровалась через породы в процессе их диагенетического преобразования. При



падении давления  $\text{CO}_2$  происходило увеличение рН среды и, как следствие, осаждение бикарбонатов в терригенных породах [21].

Приуроченность сидерита ( $\text{FeCO}_3$ ) к алевролитоглинистым прослоям, в меньшей степени к песчаным разновидностям, в изучаемых разрезах позволяет предположить, что его образование начинается на стадии диагенеза в еще неуплотненных или слабо уплот-

нённых осадках, насыщенных железом и кальцийсодержащими водами, что характерно для дельтовых болотных систем. Выделения сидерита в виде пелитоморфного агрегата, сферолитов (ранний диагенез) и конкреций (поздний диагенез) свидетельствует о некотором перераспределении вещества диагенетических минералов в позднем диагенезе из-за неравномерной концентрации растворов в разных частях осадка [22].



**Рис. 6.** Песчаник однородный средне-мелкозернистый мезомиктовый с каолинит-карбонатным цементом. Фотоснимок шлифа № 4176-17 скв. № 128 к. 1, глубина отбора 1682,04 м, пласт ВЯк-V. Николи параллельны и скрещены

**Fig. 6.** Medium-fine-grained mesomictic clay calcareous sandstone with kaolinite-carbonate cement. Thin section photo, sample No. 4176-17, well No. 128 c. 1, sampling depth 1682.04 m, layer VYak-V. In plane-polarized light on left, cross-polarized light on right

Кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ) в песчаных породах распределен неравномерно, образуя пятнистые разновидности песчаников с карбонатным цементом, что может являться результатом проявления инфильтрационных либо эксфильтрационных притоков водных растворов, миграция которых обусловлена тектоническими процессами [23]. Миграция флюидов с растворенными компонентами, катионы которых имеют различную подвижность – железа, магния, кальция и марганца, из нижележащих залежей приводит к различной интенсивности вторичной карбонатизации в породах вышележащих пластов [24]. Помимо указанного выше процесса трансформации  $\text{CO}_2$  и его влияния на карбонатобразование, кальцит может образовываться и за счет растворения Са-содержащих минералов, например, плагиоклазов или хлоритов, что фиксируется в изученных породах. Неоднородное распределение в виде пятен вторичного кальцита в нижнемеловых отложениях Большехэтской впадины отмечали также в [25].

Предлагаемые механизмы образования карбонатов яковлевской свиты позволяют объяснить их афациальность и неоднородное формирование в виде отдельных пятен и прослоев в аллювиальных дельтовых отложениях.

Изучение процессов цементации и уплотнения пород и последовательности диагенетических процессов в песчаниках [26, 27], а также условий преобразования минералов, входящих в их состав [28, 29], делает возможным объяснение причин неоднородности строения продуктивных пластов.

Органическое вещество представлено удлинёнными выделениями от чёрного до красно-бурого цвета, ступками и примазками, встречается в виде обособлений с сетчатой (ячеистой) структурой и единичных

полупрозрачных проявлений бурого цвета, часто совместно с сидеритом.

Пустотное пространство в шлифах представлено в основном межзерновыми порами, в меньшей степени наблюдается внутризерновая пористость, обусловленная растворением полевых шпатов и выщелачиванием компонентов обломков пород, и микропористость в каолините. Сообщающиеся и изолированные межзерновые поры имеют угловатую, субизометричную и заливообразную формы, их размеры варьируют от 0,1 до 0,5 мм.

Пористость пород, определённая по прокрашенным эпоксидной синей смолой шлифам, составляет от 1 % в песчаниках с базальным карбонатным цементом до 27,4 % в наиболее крупнозернистых песчаниках с каолинитовым цементом. На рис. 7 график соотношения пустотного пространства и цемента в изученных шлифах демонстрирует влияние карбонатного цемента на пористость. Так, в результате вторичной карбонатизации пород увеличение карбонатного цемента приводит к снижению пористости и, как следствие, к снижению проницаемости с 1003,53 до 0,08 мД.

Таким образом, в изученных породах наибольшее влияние на формирование фильтрационно-емкостных свойств оказали разнонаправленные постседиментационные изменения. Улучшающие пористость пород преобразования проявлены:

- в слабом уплотнении пород;
- образовании и раскристаллизации каолинита в поровом пространстве и его частичной перекристаллизации из первичного глинисто-слюдистого агрегата (с образованием микропор в каолинитовой массе);
- растворении зёрен полевых шпатов и обломков пород с образованием внутризерновых пор.

Фотографии шлифов из скв. 445 Лодочного месторождения, слева – без анализатора; справа – с анализатором.

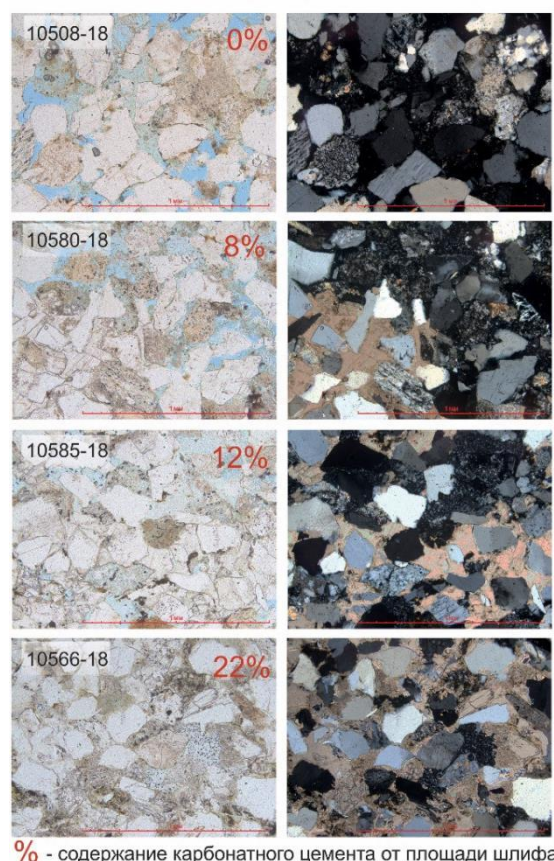


Рис. 7. Песчаники из пласта Як-V. Слева приведены фотографии песчаников фации распределительных русел, справа – диаграммы соотношений пористо-порового пространства и цемента (вверху) и зависимости пористости и проницаемости (внизу)

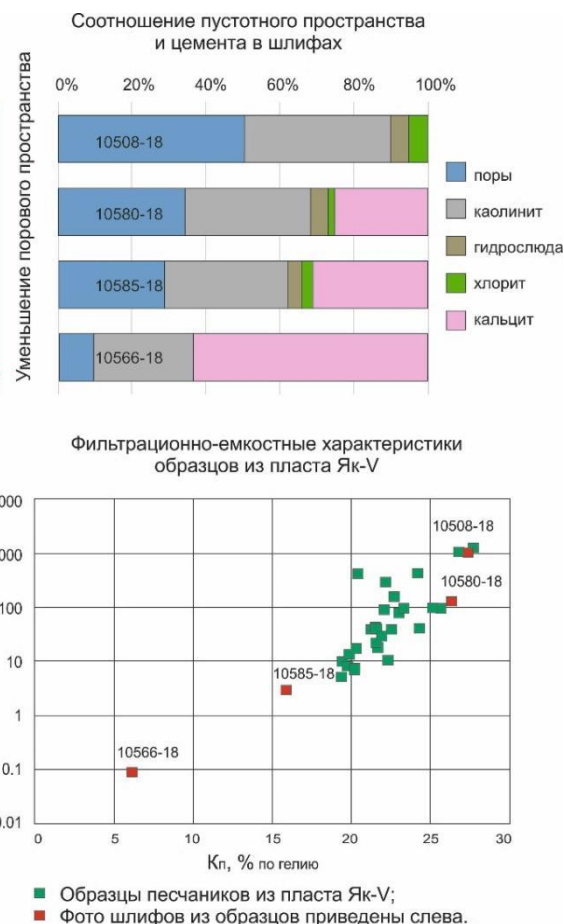
Fig. 7. Sandstones from the Yak-V layer. On the left – sandstones thin sections photos from the distribution channel facies, on the right – diagrams of the relationships between the pore space and cement (top) and the porosity and permeability dependence (bottom)

Из вторичных изменений, уменьшающих поровое пространство, необходимо отметить развитие карбонатных минералов, приводящих к сокращению и выполнению минеральным веществом пор и появлению практически непроницаемых участков.

#### Закключение

Изучение кернового материала из песчаных пластов Лодочного месторождения показало, что во время образования яковлевской свиты на территории существовала дельтовая система флювиального типа. Формирование отложений происходило в условиях смены фациальных обстановок в диапазоне от субаэральной до субаквальной части дельтовой равнины на фоне незначительных колебаний уровня моря и постепенной проградации дельты.

Среди всего многообразия комплекса фаций дельтовой системы наиболее интересными, с точки зрения фильтрационно-емкостных характеристик, оказались песчаники *распределительных русел дельтовых проток и промоин*, сформированные в условиях действия однонаправленных потоков. Песчаники этой фации сложены мелко- и среднезернистыми разностями с невыдержанной косой однонаправленной и плоскопараллельной



слоистостью ряби течения с преимущественно хорошей и средней сортировкой материала. Проницаемость русловых песчаных отложений в среднем составляет около 400 мД, в отдельных образцах достигая значений свыше 2000 мД. Среди песчаных коллекторов на Лодочном месторождении песчаники русел выделяются наибольшей толщиной прослоев до 10 м и более.

Изучение вещественного состава песчаников яковлевской свиты с использованием поляризационного микроскопа показало отсутствие смены питающих провинций на всём этапе формирования изучаемой свиты, о чём свидетельствует относительное постоянство состава обломочной части.

Анализ проявлений постседиментационных изменений позволил сделать выводы о влиянии вторичной карбонатизации на коллекторские свойства пластов яковлевской свиты. Наличие карбонатного цемента с неравномерным пятнистым характером распределения объясняет ухудшение емкостных параметров песчаников. С увеличением содержания карбонатов в пласте снижается их пористость и проницаемость, так на Лодочном месторождении в песчаниках пласта Як-V, изначально сформированных в одинаковых фациальных условиях, проницаемость варьирует в диапа-



зоне от 0,02 мД в известковистых разностях до 2195 мД в песчаниках с каолинистым цементом.

Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории физики пласта и лаборатории седиментологии

АО «ТомскНИПИнефть» за обсуждение результатов проведенных исследований и аналитический материал, предоставленный для работы, а также благодарят рецензента, комментари которого помогли улучшить статью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Япаскурт О.В. Стадиальный анализ минеральных свидетелей динамики процессов формирования и эволюции вещества осадочных пород – перспективное научное направление литологии и нефтегазовой геологии // Георесурсы. – 2016. – Т. 18. – № 1. – С. 64–68.
2. Юсеф И.М., Морозов В.П. Характеристика песчаников газонефтяных резервуаров верхнего триаса Сирии с использованием лабораторных методов анализа // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. – № 4. – Ч. 2. – С. 356–363.
3. Fic J., Pedersen K.P. Reservoir characterization of a «tight» oil reservoir, the middle Jurassic Upper Shaunavon Member in the Whitemud and Eastbrook pools, SW Saskatchewan // Marine and Petroleum Geology. – 2013. – V. 44. – P. 41–59.
4. Diagenesis and reservoir quality of the lower Cretaceous Quantou Formation tight sandstones in the southern Songliao Basin, China / K. Xi, K.Y. Cao, J. Jahren, R. Zhu, K. Bjørlykke, B.G. Haile, L. Zheng, H. Hellevang // Sedimentary Geology. – 2015. – V. 330. – P. 90–107.
5. Poursoltania M.R., Gibling M.R., Pe-Piper G. Diagenesis, burial history, and hydrocarbon potential of Cambrian sandstone in the northern continental margin of Gondwana: a case study of the Lalun Formation of central Iran // Journal of Asian Earth Sciences. – 2019. – V. 172. – P. 143–169.
6. Zhang Y., Pe-Piper G.J.W. How sandstone porosity and permeability vary with diagenetic minerals in the Scotian Basin, offshore eastern Canada: Implications for reservoir quality // Marine and Petroleum Geology. – 2015. – V. 63. – P. 28–45.
7. Xiong D., Azmy K., Blamey N.J.F. Diagenesis and origin of calcite cement in the Flemish Pass Basin sandstone reservoir (Upper Jurassic): Implications for porosity development // Marine and Petroleum Geology. – 2016. – V. 70. – P. 93–118.
8. Impacts of sedimentology and diagenesis on pore structure and reservoir quality in tight oil sandstone reservoirs: Implications for macroscopic and microscopic heterogeneities / J. Qiao, J. Zeng, S. Jiang, Y. Wang // Marine and Petroleum Geology. – 2020. – V. 111. – P. 279–300.
9. Impacts of lithologic characteristics and diagenesis on reservoir quality of the 4th member of the Upper Triassic Xujiahe Formation tight gas sandstones in the western Sichuan Basin, southwest China / Y. Yu, L. Lin, Ch. Zhai, H. Chen, Y. Wang, Y. Li, X. Deng // Marine and Petroleum Geology. – 2019. – V. 107. – P. 1–19.
10. Hillier S. Quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by X-ray powder diffraction (XRPD) // Clay mineral cements in sandstones. Special Publication / Eds. R. Worden, S. Morad. – Oxford, International Association of Sedimentologists, 2003. – P. 213–251.
11. Япаскурт О.В. Предметаморфические изменения осадочных пород в стратифере: процессы и факторы. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 259 с.
12. Страхов Н.М. Избранные труды: Общие проблемы геологии, литологии и геохимии. – М.: Наука, 1983. – 640 с.
13. Барабошкин Е.Ю. Практическая седиментология. Терригенные резервуары. Пособие по работе с керном. – Тверь: ООО «Издательство ГЕПС», 2011. – 152 с.
14. Reineck H.-E., Singh I.B. Depositional sedimentary environments with reference to terrigenous clastics. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1980. – 551 p.
15. Алексеев В.П. Атлас субаквальных фаций нижнемеловых отложений Западной Сибири (ХМАО-Югра). – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2014. – 284 с.
16. Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И. Методы определения осадочных пород. – Л.: Недра, 1986. – 240 с.
17. Шванов В.Н. Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). – Л.: Недра, 1987. – 269 с.
18. Ботвинкина Л.Н. Слоистость осадочных пород. Тр. ГИН АН СССР. – М.: Наука, 1962. – Вып. 59. – 542 с.
19. Einsele G. Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget. – Berlin: Springer-Verlag, 2000. – 792 p.
20. Копелиович А.В. Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы // Труды Акад. наук СССР. Геол. ин-т. – Вып. 121. – М.: Наука, 1965. – 312 с.
21. Страхов Н.М., Залмансон Э.С., Глаголева М.А. Очерки геохимии верхнепалеозойских отложений гумидного типа (опыт фациально-геохимического исследования). – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 223 с.
22. Ежова А.В. Литология. Краткий курс. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 102 с.
23. Япаскурт О.В. Генетическая минералогия и стадиальный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 356 с.
24. Мельник И.А., Недолико Н.М., Зимица С.В. Вторичные карбонаты юрских песчаных отложений как показатели продуктивности палеозоя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/3/2529>.
25. Постседиментационные преобразования нижнемеловых отложений Большехетской впадины (Западная Сибирь) / Ю.В. Титов, Г.Х. Шайхутдинова, С.В. Астаркин, В.В. Колпаков, Н.В. Кожевникова // Литосфера. – 2019. – № 1. – С. 48–58. URL: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-1-48-58> (дата обращения 15.09.2020).
26. Coupling relationship between sandstone reservoir densification and hydrocarbon accumulation: a case from the Yanchang Formation of the Xifeng and Ansai areas, Ordos Basin / M. Liu, Z. Liu, J. Liu, W. Zhu, Y. Huang, X. Yao // Petroleum Exploration and Development. – 2014. – V. 41. – P. 185–192.
27. How sandstone porosity and permeability vary with diagenetic minerals in the Scotian Basin, offshore eastern Canada: implications for reservoir quality / Y. Zhang, P.G. Piper, D.J.W. Piper // Marine and Petroleum Geology. – 2015. – V. 63. – P. 28–45.
28. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: models, myths, and reality / T.R. Taylor, M.R. Giles, L.A. Hathorn, T.N. Diggs, N.R. Braunsdorf, G.V. Birbiglia // AAPG Bulletin. – 2010. – V. 94. – P. 1093–1132.
29. Diagenesis of a tight gas sand reservoir: Upper Cretaceous Mesaverde Group, Piceance Basin, Colorado / M.T. Storker, B.N. Harris, C.W. Elliott, M.J. Wampler // Marine and Petroleum Geology. – 2013. – V. 40. – P. 48–68.

Поступила 22.09.2020 г.

#### Информация об авторах

**Черданцева Д.А.**, научный сотрудник лаборатории седиментологии управления лабораторными исследованиями ядра АО «ТомскНИПИнефть».

**Кравченко Г.Г.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией седиментологии управления лабораторными исследованиями ядра АО «ТомскНИПИнефть».

**Краснощекова Л.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.513: 552.144: 551.3.051

## THE YAKOVLEVSKAYA SUITE OIL-BEARING SANDSTONE FORMATION CONDITIONS IN THE LODOCHNOE OIL FIELD

**Daria A. Cherdantseva**<sup>1</sup>,  
cherdantsevada@tomsknpi.ru

**Grigory G. Kravchenko**<sup>1</sup>,  
kravchenkogg@tomsknpi.ru

**Lyubov A. Krasnoshchekova**<sup>2</sup>,  
krasnl@tpu.ru

<sup>1</sup> Tomsk oil and gas research and design institute,  
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to expand the Russian Federation resource potential due to increase in the number of hydrocarbon deposits. Today, oil is a mineral resource, which achieved production levels are not adequately provided with developed field's reserves. The productive reservoirs structure detailed study within the Vankor fields group in the future will provide an opportunity for forecasting and discovering new hydrocarbon deposits within the Lower Cretaceous Siberian deposits.

**The main aim** of the research is to determine the productive sandstone formation conditions according to the core material study, to study the field structure heterogeneity causes and to identify their characteristic signs for the subsequent forecast of the Lower Cretaceous oil deposits in the area of the Krasnoyarsk region.

**Objects:** oil-bearing sandstone layers in the Yakovlevskaya suite, Lodochnoe oil and gas deposit.

**Methods:** thin sections petrographic analysis, grain size analysis, facies and formation analysis, filtration-capacitive properties core study.

**Results.** The Upper and Lower Yakovlevskaya subsuites sandstones material composition was studied by petrographic analysis, their comparative characteristics are given. The post-sedimentation processes influence on the studied sedimentary rock appearance formation is determined. A facies model that most closely describes the productive layers sedimentation conditions is proposed. The influence of facies sedimentation conditions and post-sedimentary rocks transformations on the sandstones filtration-capacitive characteristics is established. The reasons for the carbonated interlayers presence in fluvial deposits are explained. Conclusions are drawn about the possibility of predicting the Lower Cretaceous sediments productivity accumulated in various facies environments, using the Yakovlevskaya suite in Lodochnoe deposit as an example.

### **Key words:**

Sandstone, diagenesis, Yakovlevskaya suite, alluvial environment, Krasnoyarsk region.

*The authors express their deep gratitude to the petrophysics and sedimentology laboratories staff for valuable comments and the analytical material provided for work.*

### **REFERENCES**

1. Yapaskurt O.V. Stage Analysis of Minerals that Witnessed Formation and Evolution Dynamics of Sedimentary Rocks – Perspective Scientific Direction of Lithology and Geology of Oil and Gas. *Georesources*, 2016, vol. 18, No. 1, pp. 64–68. Available at: [https://geors.ru/media/pdf/12\\_Yapaskurt\\_en.pdf](https://geors.ru/media/pdf/12_Yapaskurt_en.pdf) (accessed 20 September 2020).
2. Yousef I.M., Morozov V.P. Characteristics of Upper Triassic Sandstone Reservoirs in Syria Using Analysis of Laboratory Methods. *Georesursy*, 2017, vol. 19, No. 4, part 2, pp. 356–363. Available at: [https://geors.ru/media/pdf/2\\_Morozov\\_en.pdf](https://geors.ru/media/pdf/2_Morozov_en.pdf) (accessed 20 September 2020).
3. Fic J., Pedersen K.P. Reservoir characterization of a «tight» oil reservoir, the middle Jurassic Upper Shaunavon Member in the Whitemud and Eastbrook pools, SW Saskatchewan. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, vol. 44, pp. 41–59.
4. Xi K., Cao K.Y., Jähren J., Zhu R., Bjørlykke K., Haile B.G., Zheng L., Hellevang H. Diagenesis and reservoir quality of the lower Cretaceous Quantou Formation tight sandstones in the southern Songliao Basin, China. *Sedimentary Geology*, 2015, vol. 330, pp. 90–107.
5. Poursoltania M.R., Gibling M.R., Pe-Piper G. Diagenesis, burial history, and hydrocarbon potential of Cambrian sandstone in the northern continental margin of Gondwana: a case study of the Lalun Formation of central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 172, pp. 143–169.
6. Zhang Y., Pe-Piper G.J.W. How sandstone porosity and permeability vary with diagenetic minerals in the Scotian Basin, offshore eastern Canada: implications for reservoir quality. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, vol. 63, pp. 28–45.
7. Xiong D., Azmy K., Blamey N.J.F. Diagenesis and origin of calcite cement in the Flemish Pass Basin sandstone reservoir (Upper Jurassic): implications for porosity development. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, vol. 70, pp. 93–118.
8. Qiao J., Zeng J., Jiang S., Wang Y. Impacts of sedimentology and diagenesis on pore structure and reservoir quality in tight oil sandstone reservoirs: implications for macroscopic and microscopic heterogeneities. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, vol. 111, pp. 279–300.
9. Yu Y., Lin L., Zhai Ch., Chen H., Wang Y., Li Y., Deng X. Impacts of lithologic characteristics and diagenesis on reservoir quality of the 4<sup>th</sup> member of the Upper Triassic Xujiahe Formation tight gas sandstones in the western Sichuan Basin, southwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, vol. 107, pp. 1–19.
10. Hillier S. Quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by X-ray powder diffraction (XRPD). *Clay mineral cements in sandstones*. Special Publication. Eds. R. Worden, S. Morad. Oxford, International Association of Sedimentologists, 2003. pp. 213–251.
11. Yapaskurt O.V. *Predmetamorficheskie izmeneniya osadochnykh porod v stratisfere: protsessy i faktory* [Submetamorphic changes

- in sedimentary rocks in the stratosphere: processes and factors]. Moscow, INFRA-M Publ., 2018. 259 p.
12. Strakhov N.M. *Izbrannye trudy: obshchiye problemy geologii, litologii i geokhimii* [Selected works: general problems of geology, lithology and geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 640 p.
  13. Baraboshkin E.Yu. *Prakticheskaya sedimentologiya. Terrigennye rezervuary. Posobie po rabote s kernom* [Practical sedimentology. Terrigenous reservoirs. Manual for working with core]. Tver, GERS Publ. House, 2011. 152 p.
  14. Reineck H.-E., Singh I.B. *Depositional Sedimentary Environments with reference to terrigenous clastics*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1980. 551 p.
  15. Alekseev V.P. *Atlas subakvalnykh fatsiy nizhnemelovykh otlozheniy Zapadnoy Sibiri (KHMAO-Yugra)* [Atlas of subaquatic facies of the Lower Cretaceous sediments of Western Siberia (Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra)]. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ. House, 2014. 284 p.
  16. Logvinenko N.V., Sergeeva E.I. *Metody opredeleniya osadochnykh porod* [Methods for the determination of sedimentary rocks]. Leningrad, Nedra Publ., 1986. 240 p.
  17. Shvanov V.N. *Petrografiya peschanykh porod (komponentny sostav, sistematika i opisaniye mineralnykh vidov)* [Sandstone petrography (component composition, systematics and description of mineral species)]. Leningrad, Nedra Publ., 1987. 269 p.
  18. Botvinkina L.N. *Sloistost osadochnykh porod. Trudy GIN AN SSSR* [Layering of sedimentary rocks. GIN AN USSR Proc.]. Moscow, Nauka Publ., 1962. Issue. 59, 542 p.
  19. Einsele G. *Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget*. Berlin, Springer-Verlag, 2000. 792 p.
  20. Kopeliovich A.V. *Epigenez drevnikh tolshch yugo-zapada Russkoy platform. Trudy Akademii nauk SSSR. Geol. in-t* [Epigenesis of ancient strata the Russian platform south-west. Trudy Akad. Sciences of the USSR. Geol. in-t]. Moscow, Nauka Publ., 1965. Iss. 121, 312 p.
  21. Strakhov N.M., Zalmanson E.S., Glagoleva M.A. *Ocherki geokhimii verkhnepaleozoyskikh otlozheniy gumidnogo tipa (opyt fatsialno-geokhimicheskogo issledovaniya)* [Essays on the geochemistry of the Upper Paleozoic deposits of the humid type (experience of facies-geochemical studies)]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ. House, 1959. 223 p.
  22. Ezhova A.V. *Litologiya. Kratkij kurs* [Lithology. Short course]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2014. 102 p.
  23. Yapaskurt O.V. *Geneticheskaya mineralogiya i stadialny analiz protsessov osadochnogo porodo- i rudoobrazovaniya* [Genetic mineralogy and stage analysis of sedimentary rock and ore formation processes]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017. 356 p.
  24. Melnik I.A., Nedolivko N.M., Zimina S.V. Secondary carbonates of Jurassic sand deposits as indicators of the Paleozoic productivity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/3/2529>.
  25. Titov Yu.V., Shayhutdinova G.H., Astarkin S.V., Kolpakov V.V., Kozhevnikova N.V. Postsedimentatsionnye preobrazovaniya nizhnemelovykh otlozheniy Bolshekhetskoy vpadiny (Zapadnaya Sibir) [Manifestations of post-sedimentation processes in the Lower Cretaceous sediments of Bolshekhetskaya depression (Western Siberia)]. *Litosfera*, 2019, no. 1, pp. 48–58.
  26. Liu M., Liu Z., Liu J., Zhu W., Huang Y., Yao X. Coupling relationship between sandstone reservoir densification and hydrocarbon accumulation: a case from the Yanchang Formation of the Xifeng and Ansai areas, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, vol. 41, pp. 185–192.
  27. Zhang Y., Piper P.G., Piper D.J.W. How sandstone porosity and permeability vary with diagenetic minerals in the Scotian Basin, offshore eastern Canada: implications for reservoir quality. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, vol. 63, pp. 28–45.
  28. Taylor T.R., Giles M.R., Hathon L.A., Diggs T.N., Braunsdorf N.R., Birbiglia G.V. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: models, myths, and reality. *AAPG Bulletin*, 2010, vol. 94, pp. 1093–1132.
  29. Storker M.T., Harris B.N., Elliott C.W., Wampler M.J. Diagenesis of a tight gas sand reservoir: Upper Cretaceous Mesaverde Group, Piceance Basin, Colorado. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, vol. 40, pp. 48–68.

Received: 22 September 2020.

#### Information about the authors

**Daria A. Cherdantseva**, reseracher, Tomsk oil and gas research and design institute.

**Grigory G. Kravchenko**, Cand. Sc., head of the laboratory, Tomsk oil and gas research and design institute.

**Lyubov A. Krasnoshchekova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.279.72

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЛЯНОКИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ СКВАЖИН ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЕЙШИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ

Хабибуллин Марат Яхиевич,  
m-hab@mail.ru

Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьский,  
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54-а.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью обеспечивать равномерный нагрев раствора кислоты при скоростях закачки, создаваемых агрегатами, на термокислотные образцы. Решение этой проблемы позволит повысить эффективность кислотных и термокислотных обработок сильно дренированных скважин с низким пластовым давлением.

**Цель:** разработать и предложить метод кислотного и термокислотного импульсирования, методику его применения и создать конструкции подземного и наземного оборудования скважин для осуществления разработанного метода.

**Объекты.** Объем раствора, заливаемого в насосно-компрессорные трубы при термокислотной обработке методом импульсирования, зависит от их длины и внутреннего диаметра. Обычно он принимается равным 1,2–2 м<sup>3</sup>. Если в скважине, намеченной для проведения термокислотной обработки методом импульсирования, фильтр или его некоторая часть оказывались перекрытыми песчаной пробкой, то их предварительно очищали желонкой, не вскрывая зумпфа. А также используется специальный перфорированный наконечник и специальная заливочная головка.

**Методы.** Термокислотную (как и кислотную) обработку скважины методом импульсирования проводят без применения насосного агрегата, что позволяет значительно сократить расходы. Ускорение движения кислотного раствора, нагрев всего объема до нужной температуры и создание давления (за счет веса столба раствора) способствуют увеличению глубины проникновения и эффективности воздействия кислоты на пласт.

**Результаты.** Наиболее подходящим кислотным раствором для термокислотного импульсирования является 15%-я HCl, ингибированная униколом. Хорошие результаты дало внедрение способа кислотного импульсирования, предусматривающего использование специального наконечника, в котором канал штуцера полностью закрыт магниевым стержнем. В результате реакции магниевый стержень растворяется в кислотном растворе, после чего последний устремляется через освободившийся канал штуцера и перфорированный патрубок в фильтр, создавая так называемый кислотный импульс, т. е. достигается повышение скорости закачки под действием гидростатического давления.

### Ключевые слова:

Скорость, закачка, реактор, уникол, магний, стружка, песчаный.

### Введение

Скорость закачки неравномерного нагрева кислоты при термокислотных образцах, создаваемая агрегатами, обусловлена следующим. Первая порция раствора перегревается, а последующие оказываются недостаточно нагретыми. Поэтому эффективность кислотных и термокислотных обработок сильно дренированных скважин с низким пластовым давлением довольно низкая [1–4]. Для повышения эффективности предложен метод кислотного и термокислотного импульсирования, разработана методика его применения и созданы несложные конструкции необходимого подземного и наземного оборудования скважин (реакторы-наконечники и универсальная устьева головка).

Способ термокислотного импульсирования основан на применении специального реактора-наконечника (рис. 1). Реактор, основными узлами которого являются клапан и собственно реактор, заполненный магниевой стружкой, спускают в скважину на насосно-компрессорных трубах до упора в забой своим перфорированным патрубком-наконечником. В момент упора шток корпуса клапана поднимает шарик с седла клапана, и кислотный раствор, предварительно залитый в насосно-компрессорные трубы, проникает в прифильтровую зону продуктивного пласта. Скорость прохождения раствора из колонны насосных труб через реактор с

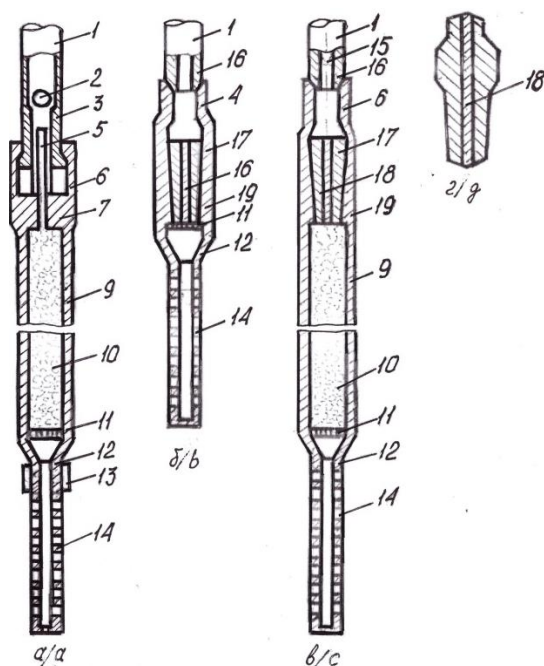
магниевой стружкой вначале гораздо выше скорости, которая создавалась при закачке кислотного раствора агрегатом. Затем по мере снижения уровня кислотного раствора в трубах скорость вытекания его уменьшается. Таким образом, достигается равномерный прогрев кислотного раствора до требуемой примерно постоянной температуры [5–8].

Следует отметить, что в скважинах до термокислотной обработки методом импульсирования безуспешно проводились обычные кислотные и термокислотные обработки. Скорость истечения кислотного раствора из насосно-компрессорных труб после открытия клапана реактора-наконечника при проведении термокислотного импульсирования показана на рис. 2.

Объем раствора, заливаемого в насосно-компрессорные трубы при термокислотной обработке методом импульсирования, зависит от их длины и внутреннего диаметра. Обычно он принимается равным 1,2–2 м<sup>3</sup>.

Если в скважине, намеченной для проведения термокислотной обработки методом импульсирования, фильтр или его некоторая часть оказывались перекрытыми песчаной пробкой, то их предварительно очищали желонкой, не вскрывая зумпфа [9–11].

Термокислотную (как и кислотную) обработку скважины методом импульсирования проводят без применения насосного агрегата, что позволяет значительно сократить расходы.

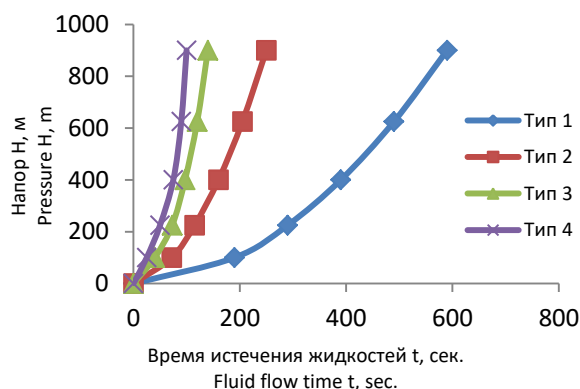


**Рис. 1.** Реакторы-наконечники для кислотной и термокислотной обработки скважин методом импульсирования: а) реактор-наконечник для термокислотного импульсирования; б) наконечник для кислотного импульсирования; в) универсальный реактор-наконечник для кислотного и термокислотного импульсирования; г) конус с магниевым стержнем (сбрасываемый в скважину при многократной обработке). 1 – насосно-компрессорная труба; 2 – шарик клапана; 3 – седло клапана; 4 – муфта переводная; 5 – соединительный патрубок; 6 – упорный патрубок; 7 – корпус клапана; 9 – реактор; 10 – магниевая стружка; 11 – фильтр (решетка); 12 – переводник; 13 – муфта соединительная; 14 – перфорированный патрубок-наконечник; 15 – седло для конуса с магниевым стержнем; 16 – соединительный патрубок (переводник); 17 – вкладыш итуцера; 18 – магниевый стержень; 19 – корпус итуцера

**Fig. 1.** Reactor-tips for acid and thermo-acid treatment of wells by the method of impulse: a) reactor-tip for thermo-acid impulse; b) tip for acid impulse; c) universal reactor-tip for acid and thermo-acid impulses; g) cone with a magnesium rod (discharged into the well during repeated processing). 1 – pump-compressor pipe; 2 – valve ball; 3 – valve seat; 4 – coupling transferable; 5 – connecting pipe; 6 – persistent branch pipe; 7 – valve body; 9 – reactor; 10 – magnesium shavings; 11 – filter (grill); 12 – sub; 13 – coupling conjoint; 14 – perforated nozzle-tip; 15 – saddle for a cone with a magnesium core; 16 – connecting pipe (sub); 17 – fitting insert; 18 – magnesium rod; 19 – fitting body

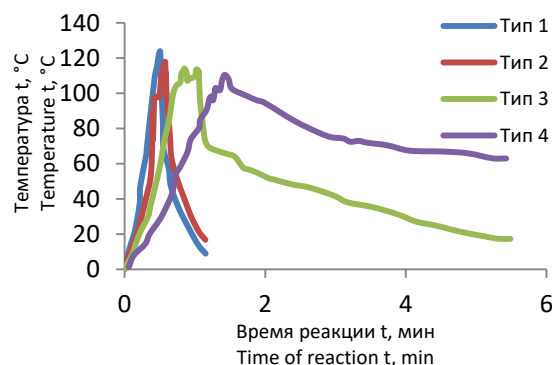
Ускорение движения кислотного раствора, нагрев всего объема до нужной температуры и создание давления (за счет веса столба раствора) способствуют увеличению глубины проникновения и эффективности воздействия кислоты на пласт.

На рис. 3 показаны термограммы, снятые при импульсной прокачке кислоты (с переменным напором) через стружку магния.



**Рис. 2.** Расчетное время  $t$  истечения жидкости из 73-мм труб при переменном напоре  $H$  в зависимости от диаметра итуцера  $d$ : Тип 1:  $d=10$  мм, Тип 2:  $d=15$  мм, Тип 3:  $d=20$  мм, Тип 4:  $d=25$  мм

**Fig. 2.** Estimated time  $t$  of fluid outflow from 73 mm pipes with a variable head  $H$  depending on the diameter of the nozzle  $d$ : Type 1:  $d=10$  mm, Type 2:  $d=15$  mm, Type 3:  $d=20$  mm, Type 4:  $d=25$  mm



**Рис. 3.** Термограммы, снятые на стендовой установке в процессе термокислотного импульсирования при реакции: Тип 1 – 10%-й HCl со стружкой магния; Тип 2 – 15%-й HCl со стружкой магния; Тип 3 – 15%-й HCl, ингибированной формалином; Тип 4 – 15%-й HCl, ингибированной уником

**Fig. 3.** Thermograms taken on a bench installation in the process of thermo-acid impulse during the reaction: Type 1 – 10 % HCl with magnesium chips; Type 2 – 15 % HCl with magnesium chips; Type 3 – 15 % HCl inhibited by formalin; Type 4 – 15 % HCl inhibited by unicol

Соляная кислота 15%-й концентрации препарировалась формалином и уником. Известно, что время реакции солям кислоты с магнием зависит от присутствия в кислотном растворе этих ингибиторов. Применение уника для ингибирования кислоты, которая идет на термохимическую часть процесса, тормозит реакцию, особенно при повышенном давлении, почти в 20 раз [12, 13].

После каждой опытной прокачки соляной кислоты фиксировалась остаточная кислотность раствора (табл. 1).

Вначале способ термокислотного импульсирования предназначался для сильно дренированных скважин. Но, как показала практика, его можно успешно применять и при обработке скважин других катего-

рий, причем в зависимости от диаметра эксплуатационной колонны и диаметра реактора (кожуха) расход кислоты может быть изменен. Обычно применяется 114-мм реактор, но для 114- или 127-мм эксплуатационной колонны можно использовать реактор диаметром 48 или 88 мм, соответственно удлиненный для сохранения необходимой емкости, чтобы уместить нужное количество магниевой стружки.

**Таблица 1.** Остаточная кислотность раствора после термокислотного импульсирования

**Table 1.** Residual acidity of the solution after thermoacid pulsation

Кислотный рас-р после реакции с магнием, % Acid solution after reaction with magnesium, %	Остаточное содержание HCl Residual HCl
10%-я HCl	9,5
15%-я HCl	13,7
15%-я HCl, ингибированная формалином 15 % formalin inhibited HCl	12,9
15%ая HCl, ингибированная уникомол 15 % unicol inhibited HCl	12,4

Наконечник (рис. 1, а), несмотря на простоту своей конструкции, все же имел существенный недостаток: раскрытие клапана было сопряжено с допуском хвостовика до забоя. В условиях пескопроявлений, когда в процессе эксплуатации скважин песок скапливается на забое, спуск хвостовика до упора в забой связан с опасностью прихвата труб. Поэтому был предложен и внедрен новый специальный наконечник [14–16]. Основная часть этого наконечника представляет собой штуцер, канал которого закрыт магниевым стержнем (рис. 1, в).

Хорошие результаты дало внедрение способа кислотного импульсирования, предусматривающего использование специального наконечника, в котором канал штуцера полностью закрыт магниевым стержнем (рис. 1, б) [17]. Наконечник спускают в скважину на насосно-компрессорных трубах до тех пор, пока перфорированный патрубок его не установится против эксплуатационного объекта (в этом случае не нужно, чтобы патрубок упирался в забой). Затем в колонну насосно-компрессорных труб заливают кислотный раствор, который удерживается в ней вследствие перекрытия канала штуцера магниевым стержнем.

В результате реакции магниевый стержень растворяется в кислотном растворе, после чего последний устремляется через освободившийся канал штуцера и перфорированный патрубок в фильтр, создавая так называемый кислотный импульс, т. е. достигается повышение скорости закачки под действием гидростатического давления. Давление, создающееся при этом на забое сильно дренированной скважины, способствует значительно большему проникновению активного кислотного раствора в пласт по сравнению с обычной кислотной обработкой.

Длину магниевго стержня подбирают по составленной нами номограмме (рис. 2), в основу которой были положены лабораторные исследования растворения магниевго стержня длиной 10 мм и диаметром 10 мм (помещенного в патрон наподобие вкладыша) в

15%-м растворе соляной кислоты [18]. При построении номограммы исходили из расчета, что полное растворение магниевго стержня должно наступить не раньше полной заливки труб кислотным раствором (в момент окончания последней).

Задаваясь длиной и диаметром спускаемых в скважину насосно-компрессорных труб, определяют объем кислотного раствора. Далее, задаваясь скоростью слива кислотного раствора в насосно-компрессорные трубы (регулируемой открытием вентили на автоцистерне), находят время заливки труб и длину магниевго стержня. Так, в указанном случае при скорости слива 1 л/сек время заливки равно 53 мин, а длина стержня – 17 мм.

Существенным недостатком способа кислотного импульсирования (как и термокислотного) является ограничение объема кислотного раствора емкостью спущенных насосно-компрессорных труб.

Следует заметить, что часто бывает целесообразно использовать больший объем раствора. Поэтому был предложен и внедрен способ многократного кислотного импульсирования без извлечения насосно-компрессорных труб из скважин. Для применения указанного способа предложен универсальный реактор-наконечник (рис. 1, в, з).

Проведение многократного импульсирования стало возможным потому, что в комплекте нового реактора имеется ряд конусных седел, устанавливаемых последовательно в насосно-компрессорных трубах (на рис. 1, в показано лишь одно седло – 15); причем диаметр отверстия в каждом седле, расположенном выше, больше, чем у седла, находящегося ниже. После проведения однократного кислотного импульсирования в насосно-компрессорные трубы забрасывается конус (рис. 1, з), который перекрывает отверстие седла. Отверстие конуса заполнено магниевым стержнем – 18. Затем можно снова заливать кислотный раствор в насосно-компрессорные трубы и т. д. (как при однократном кислотном импульсировании). Эту операцию можно повторять несколько раз, используя заранее установленные седла и забрасывая каждый раз соответствующие конусы с магниевыми стержнями (длина их во всех случаях определяется по номограмме) [19]. При многократном импульсировании число импульсов определяют исходя из выбранного объема кислотного раствора и объема раствора, который можно поместить в спущенные трубы.

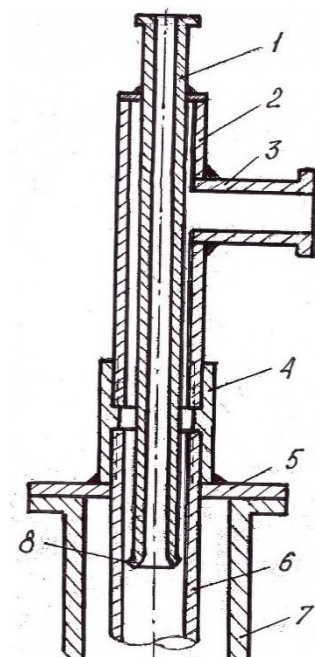
В сильно дренированных скважинах целесообразно сначала провести термокислотное импульсирование (особенно если из нее добывалась парафинистая нефть). Для этого можно использовать универсальный реактор-наконечник (рис. 1, в). После термокислотного импульсирования можно, не поднимая труб, проводить нужное число раз кислотное импульсирование. Для этого надо предварительно установить в насосно-компрессорных трубах необходимое число седел – 15 (рис. 1, в) и забрасывать перед каждой кислотной импульсной обработкой соответствующий конус с магниевым стержнем (рис. 1, з).

При использовании обычной заливочной головки поршнеобразное движение раствора в трубах вызыва-



ло периодические прорывы воздуха к устью скважины. При этом воздух увлекал за собой и кислотный раствор, поэтому приходилось периодически прекращать заливку раствора в трубы.

Предложена специальная заливочная головка (рис. 4). Внешний 73-мм патрубок – 2 головки имеет отвод – 3 для слива кислотного раствора в насосно-компрессорные трубы – 6, а внутренний 48-мм патрубок – 1 служит для выхода вытесняемого в атмосферу воздуха. После того как спущены трубы и на них установлена указанная головка, через отвод – 3 сливается кислотный раствор. Попадая в кольцевое пространство, раствор вначале стекает по направляющим – 8, а затем по стенкам насосно-компрессорных труб – 6. Вытесняемый воздух занимает центральное положение и удаляется через патрубок – 1. В результате внедрения такой головки исключены потери времени на слив в трубы кислотного раствора, а также потери последнего из-за выбросов (вместе с воздухом); загрязнения устья скважины, а также обеспечивается безопасность труда работников, занятых импульсной кислотной обработкой.



**Рис. 4.** Универсальная устьевая головка для кислотной и термокислотной обработки скважин методом импульсирования: 1 – 48-мм патрубок; 2 – 73-мм патрубок; 3 – 73-мм отвод; 4 – посадочная муфта; 5 – планшайба; 6 – насосно-компрессорная труба; 7 – эксплуатационная колонна; 8 – направляющие для стока кислотного раствора

**Fig. 4.** Universal wellhead for acid and thermal acid treatment of wells by a pulsation method: 1 – 48 mm nozzle; 2 – 73 mm pipe; 3 – 73 mm bend; 4 – landing clutch; 5 – faceplate; 6 – tubing; 7 – production casing; 8 – guides for drainage of acid solution

В целях установления эффективности импульсных термокислотных обработок по сравнению с операциями простых термокислотных работ определена вероятность удачных операций. При этом асимметричное

распределение скважин по эффективности было выровнено при помощи распределения Шарлье [20].

Результаты вычисления вероятности удачных исходов при импульсных термокислотных обработках приведены в табл. 2, где также для сопоставления указана и вероятность эффективности обычных термокислотных обработок, подсчитанных выше.

**Таблица 2.** Вероятность эффективности операций

**Table 2.** Probability of operational efficiency

Операции Operations	По результатам вычислений According to the results of calculation			
	прироста дебита growth rate		продолжительности работы скважины на повышенном дебите duration of well operation at increased flow rate	
	Термокислотные обычные Thermoacids ordinary	Термокислотные импульсные Thermoacids pulse	Термокислотные обычные Thermoacids ordinary	Термокислотные импульсные Thermoacids pulse
Высокоэффективные Highly efficient	9	22	7	11
Эффективные Efficient	11	34	22	23
Неэффективные Inefficient	80	44	73	66

Следует отметить, что сопоставление двух групп чисел может быть справедливым при условии, когда отличие их средних незначительно. Указанные группы чисел были обработаны, в результате чего установлено, что совокупность, представленная ими, различна. Как видно из табл. 2, эффективность операций по кислотным обработкам путем импульсирования больше эффективности термокислотных обработок по результатам вычислений как прироста дебита нефти, так и продолжительности работы скважин на повышенном дебите.

#### Закключение

На основании проведенных опытов можно сделать следующие выводы.

- 1) Процесс термокислотного импульсирования для достижения равномерного нагрева кислотного раствора регулируется путем:
  - а) повышения давления прокачки (напор регулируется столбом жидкости, заливаемой в трубы);
  - б) уменьшения скорости закачки; скорость прохождения раствора из колонны насосных труб через реактор с магниевой стружкой вначале оказывается гораздо выше скорости, создаваемой при закачке кислотного раствора агрегатом; затем по мере падения уровня кислоты в трубах скорость истечения ее снижается; в результате достигается равномерный прогрев кислотного раствора до требуемой температуры.
- 2) Ингибирование HCl формалином и униколом тормозит реакцию. Однако только уникол спосо-

бен растянуть реагирование HCl с магнием на необходимое время, в течение которого протекает весь процесс прокачки кислоты через сопла.

Таким образом, наиболее подходящим кислотным раствором для термокислотного импульсирования является 15%-я HCl, ингибированная уником.

В результате реакции магниевый стержень растворяется в кислотном растворе, после чего последний устремляется через освободившийся канал штанги и перфорированный патрубок в фильтр, создавая так называемый кислотный импульс, т. е. достигается повышение скорости закачки под действием гидростатического давления. Давление, создающееся при этом на забое сильно дренированной скважины, спо-

собствует значительно большему проникновению активного кислотного раствора в пласт по сравнению с обычной кислотной обработкой.

Конструкция этого устройства имеет следующие преимущества:

- 1) штанга открывается без применения трактора-подъемника;
- 2) процесс кислотной обработки можно проводить в скважинах, имеющих зумпф (карман ниже фильтровой зоны) значительной длины;
- 3) при наличии песчаной пробки или построении предметов на забое отсутствует опасность прихвата труб.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислотная обработка призабойной зоны пласта баженовской свиты после проведения гидроразрыва пласта / В.Т. Литвин, К.В. Стрижнев, Т.Н. Шевчук, П.В. Рошин // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 4. – С. 70–73.
2. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065.
3. Zhang H., Liang Y., Zhou X. Sensitivity analysis and optimal operation control for large-scale water flooding pipeline network of oilfield // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 154. – P. 38–48.
4. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of optimal design of a universal device for nonstationary pulse pumping of liquid in a reservoir pressure maintenance system // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – V. 54. – Iss. 3–4. – P. 225–232. DOI: 10.1007/s10556-018-0467-2.
5. Эффективность кислотных обработок нагнетательных скважин / К.Ш. Ямалетдинова, А.Ш. Халадов, Ю.В. Дудников, А.А. Ямалетдинова, А.Р. Габдуллин // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 12. – С. 278–283; URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36642> (дата обращения: 24.01.2020).
6. Meirmanov A., Nekrasova I. Mathematical models of a hydraulic shock // Journal of mathematical analysis and applications. – 2013. – V. 408. – Iss. 1. – P. 76–90.
7. Studying heat-affected zone deformations of electric arc welding / R.I. Suleimanov, L.Z. Zainagalina, M.Y. Khabibullin, L.M. Zaripova, N.O. Kovalev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – P. 032053. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032053.
8. Кислотные обработки: составы, механизмы реакций, дизайн / В.Н. Глушенко, О.А. Пташко, Р.Я. Харисов, А.В. Денисова. – Уфа: Гилем, 2010. – 392 с.
9. Kadochnikova L.M., Pichugin O.N., Chebakov A.A. Analytical technique for gel treatment prediction of production and injection wells in a stratified reservoir // Iranian Journal of Science & Technology. – 2002. – Transaction B. – V. 26. – B2. – P. 205–216.
10. Zaichenko A.Yu., Glazov S.V., Salgansky E.A. Filtration combustion of viscous hydrocarbon liquids // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2017. – V. 51. – Iss. 5. – P. 673–679.
11. The application of X-ray Micro Computed Tomography (Micro-CT) of core sample for estimation of physicochemical treatment efficiency / M.S. Orlov, P.V. Roschin, I.A. Struchkov, V.T. Litvin // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 2015. SPE-176600-MS. DOI: 10.2118/176600-MS.
12. Коннов Ю.Д., Сидоркин Д.И., Хабибуллин М.Я. Механизация технологического процесса спуско-подъемных операций при текущем и капитальном ремонте скважин // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2018. – № 2. – С. 15–24. DOI: 10.5510/OGP20180200346.
13. Assem A.I., Nasr-El-Din H.A., De Wolf C.A. Formation damage due to iron precipitation in carbonate rocks // SPE European Formation Damage Conference & Exhibition. – 2013. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/165203-MS> (дата обращения: 24.01.2020).
14. Wenyue S., Mun-Hong H. Forecasting and uncertainty quantification for naturally fractured reservoirs using a new data-space inversion procedure // 15th Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR). – Amsterdam, Netherlands: European Assoc. Geoscientists & Engineers Computational geosciences, 2017. – V. 21. – Iss. 5–6. – P.1443–1458.
15. Rady A. Iron precipitation in calcite, dolomite and sandstone cores // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/176574-MS> (дата обращения: 24.01.2020).
16. Rabie A.I. Sodium gluconate as a new environmentally friendly iron-controlling agent for HP/HT acidizing treatments // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/172640-MS> (дата обращения: 24.01.2020).
17. Литвин В.Т., Стрижнев К.В., Рошин П.В. Особенности строения и интенсификации притоков нефти в сложных коллекторах баженовской свиты Пальнянского месторождения // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. – Т. 10. – № 3. URL: [http://www.ngtp.ru/rub/11/36\\_2015.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/11/36_2015.pdf) (дата обращения: 24.01.2020).
18. Гиляев Ген.Г., Хабибуллин М.Я., Гиляев Г.Г. Перспективы применения кислотного геля для закачки проппанта в процессе проведения гидроразрыва карбонатных пластов на территории самарской области // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 8. – С. 54–57.
19. Nsoga V.N., Hona J., Pemha E. Numerical simulation of heat distribution with temperature-dependent thermal conductivity in a two-dimensional liquid flow // International Journal of nonlinear sciences and numerical simulation. – 2017. – V. 18. – Iss. 6. – P. 507–513.
20. Abdyukova R.Y. Studies on operation and types of drilling pump valves // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012050.

Поступила 23.09.2020 г.

## Информация об авторах

**Хабибуллин М.Я.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьский.

UDC 622.279.72

## IMPROVEMENT OF HYDROXYLIC ACID WELL PROCESSING APPLYING THE LATEST TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Marat Ya. Khabibullin,  
m-hab@mail.ru

Branch of the Ufa State Petroleum Technical University in Oktyabrsky,  
54-a, Devonskaya avenue, Oktyabrsky, 452607, Russia.

**The relevance** the research is caused by the need to ensure uniform heating of the acid solution at the injection rates created by the units onto the thermoacid samples. A solution to this problem will improve the efficiency of acid and thermal acid treatments of highly drained wells with low reservoir pressure.

**The main aim** of the research is to develop and propose a method of acid and thermoacid impulse, a methodology for its application and to create structures for underground and surface equipment of wells for implementation of the developed method.

**Objects.** The volume of the solution poured into the tubing during thermo-acid treatment by the pulsing method depends on their length and inner diameter. Usually it is taken equal to 1,2–2 m<sup>3</sup>. If the filter or some its part turned out to be blocked with a sand plug in the well, scheduled for thermal acid treatment by the pulsing method, then they were preliminarily cleaned with a thief without opening the sump. A special perforated tip and a special filling head are used as well.

**Methods.** Thermal acid (as well as acidic) treatment of a well by the pulsing method is carried out without the use of a pump unit, which can significantly reduce costs. Accelerating the movement of the acid solution, heating the entire volume to the desired temperature and creating pressure (due to the weight of the solution column) contribute to an increase in the depth of penetration and the effectiveness of the action of the acid on the formation.

**Results.** The most suitable acid solution for thermoacid impulse is 15 % HCl, inhibited by unicol. Good results were obtained by introduction of the acid impulse method, which involves the use of a special tip, in which the nozzle channel is completely closed with a magnesium rod. As a result of the reaction, the magnesium rod dissolves in the acid solution, after which the latter rushes through the vacated choke channel and the perforated pipe into the filter, creating the so-called acid pulse, i. e. increase in the injection rate is achieved under the action of hydrostatic pressure.

### Key words:

Speed, injection, reactor, unicol, magnesium, shavings, sand.

### REFERENCE

- Litvin V.T., Strizhnev K.V., Shevchuk T.N., Roshchin P.V. Acid treatment bottomhole formation zone of the Bazhenov formation after hydraulic fracturing layer. *Oil industry*, 2018, no. 4, pp. 70–73. In Rus.
- Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, pp. 012065. DOI: 10.1088 / 1757-899X / 560/1/012065.
- Zhang H., Liang Y., Zhou X. Sensitivity analysis and optimal operation control for large-scale waterflooding pipeline network of oilfield. *Journal of petroleum science and engineering*, 2017, vol. 154, pp. 38–48.
- Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Selection of optimal design of a universal device for nonstationary pulse pumping of liquid in a reservoir pressure maintenance system. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 54, Iss. 3–4, pp. 225–232. DOI: 10.1007/s10556-018-0467-2.
- Yamaletdinova K.Sh., Khaladov A.Sh., Dudnikov Yu.V., Yamaletdinova A.A., Gabdullin A.R. The effectiveness of acid treatments for injection wells. *Successes modern science*, 2017, no. 12, pp. 278–283; URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36642> (accessed: 01.24.2020). In Rus.
- Meirmanov A., Nekrasova I. Mathematical models of a hydraulic shock. *Journal of mathematical analysis and applications*, 2013, vol. 408, Iss. 1, pp. 76–90.
- Suleimanov R.I., Zainagalina L.Z., Khabibullin M.Y., Zaripova L.M., Kovalev N.O. Studying heat-affected zone deformations of electric arc welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, p. 032053. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032053.
- Glushchenko V.N., Ptashko O.A., Kharisov R.Ya., Denisova A.V. *Acid treatments: compositions, reaction mechanisms, design*. Ufa, Guillem, 2010. 392 p.
- Kadochnikova L.M., Pichugin O.N., Chebakov A.A. Analytical technique for gel treatment prediction of production and injection wells in a stratified reservoir. *Iranian Journal of Science & Technology*, 2002, Transaction B, vol. 26, B2, pp. 205–216.
- Zaichenko A.Yu., Glazov S.V., Salgansky E.A. Filtration combustion of viscous hydrocarbon liquids. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2017, vol. 51, Iss. 5, pp. 673–679.
- Orlov M.S., Roschin P.V., Struchkov I.A., Litvin V.T. The application of X-ray Micro Computed Tomography (Micro-CT) of core sample for estimation of physicochemical treatment efficiency. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2015. SPE-176600-MS. DOI: 10.2118/176600-MS.
- Konnov Yu.D., Sidorkin D.I., Khabibullin M.Ya. Mechanization of the technological process of tripping and lifting operations during routine and overhaul of wells. *Scientific works of NIPI Neftegaz SOCAR*, 2018, no. 2, pp. 15–24. DOI: 10.5510/OGP20180200346. In Rus.
- Assem A.I., Nasr-El-Din H.A., De Wolf C.A. Formation damage due to iron precipitation in carbonate rocks. *SPE European Formation Damage Conference & Exhibition*, 2013. Available at: <http://dx.doi.org/10.2118/165203-MS> (accessed: 24 January 2020).
- Wenyue S., Mun-Hong H. Forecasting and uncertainty quantification for naturally fractured reservoirs using a new data-space inversion procedure. *15<sup>th</sup> Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR)*. Amsterdam, Netherlands, European Assoc. Geoscientists & Engineers Computational geosciences, 2017. Vol. 21, Iss. 5–6, pp. 1443–1458.
- Rady A. Iron precipitation in calcite, dolomite and sandstone cores. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.2118/176574-MS> (accessed: 24 January 2020).
- Rabie A.I. Sodium gluconate as a new environmentally friendly iron-controlling agent for HP/HT acidizing treatments. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.2118/172640-MS> (accessed: 24 January 2020).
- Litvin V.T., Strizhnev K.V., Roshchin P.V. Features of the structure and intensification oil inflows in complex reservoirs of the Bazhenov formation of the Palyanovsky deposits. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2015, vol. 10, no. 3. In Rus. Available

- at: [http://www.ngtp.ru/rub/11/36\\_2015.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/11/36_2015.pdf) (accessed: 24 January 2020).
18. Gilaev Gen.G., Khabibullin M.Ya., Gilaev G.G. Prospects for using acid gel for pumping proppant in the process of hydraulic fracturing of carbonate reservoirs in the Samara region. *Oil industry*, 2020, no. 8, pp. 54–57. In Rus.
  19. Nsoga V.N., Hona J., Pemha E. Numerical simulation of heat distribution with temperature-dependent thermal conductivity in a two-dimensional liquid flow. *International Journal of nonlinear sciences and numerical simulation*, 2017, vol. 18, Iss. 6, pp. 507–513.
  20. Abdyukova R.Y. Studies on operation and types of drilling pump valves. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. pp. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012050.

*Received: 23 September 2020.*

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

**Marat Ya. Khabibullin**, Cand. Sc., associate professor, Branch of the Ufa State Petroleum Technical University in Oktyabrsky.

УДК 551.510:630\*561.24

## АНАЛИЗ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Устинова Ирина Георгиевна<sup>1</sup>,  
igu@tpu.ru

Бондаренко Светлана Леонидовна<sup>2</sup>,  
bond\_sl@mail.ru

Рожкова Ольга Владимировна<sup>1</sup>,  
rov@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.

**Актуальность.** Прогноз состояния природных ресурсов и изменений климата всегда актуален, так же как и поиск новых математических подходов. Анализ дендрохронологических и климатических временных рядов дает важную информацию для описания этих рядов, понимания, а также предсказания поведения рядов, характеризующих годичный прирост лесов, протекающих в них экологических процессов, а также климата в целом. Работы такого плана полезны и связаны с необходимостью сохранения заповедных лесных зон и развития лесной индустрии в целом.

**Цель:** прогнозирование природных ресурсов и климата на основе выделения и использования многолетних трендов и тригонометрических составляющих известных характеристик: плотности годичных колец, изменений общего содержания озона в атмосфере, влияющего на уровень УФ-В радиации или УФ-В, и индекса аридности де Мортон, содержащего информацию о температуре и влажности лесных зон; представление исходных временных рядов в аддитивной форме в аналитическом виде.

**Объекты:** временные ряды общего содержания озона в атмосфере, плотности годичных колец и индексов аридности де Мортон.

**Методы:** анализ временных рядов (декомпозиция временного ряда, идентификация параметров модели, прогнозирование временного ряда), статистический анализ (F-критерий,  $\chi^2$ -критерий Пирсона).

**Результаты.** Произведен анализ дендрохронологических и климатических данных на предмет наличия тригонометрической компоненты. Это дало возможность получить сведения для прогноза температуры, осадков, УФ-В и др. Получены аналитические выражения для тригонометрических составляющих максимальной плотности годичных колец, общего содержания озона, индекса аридности де Мортон. Совокупность тригонометрической составляющей и тренда позволяет получить достоверный прогноз и реконструкцию условий формирования годичных колец и плотности древесины. Прогнозные модели аппроксимации временных рядов тригонометрическим полиномом могут конкурировать с прогнозными моделями временных рядов спектрально-сингулярного разложения («Гусеница»).

### Ключевые слова:

Временной ряд, тренд, тригонометрическая составляющая, прогнозирование, дендрохронологический метод.

### Введение

Моделирование рядов атмосферных и дендрохронологических параметров предполагает реконструкцию и прогноз как самих рядов, так и отдельных их компонент, связанных с циклическими колебаниями различных природных процессов [1–3].

В настоящее время известны многочисленные методы исследования и анализа временных рядов: корреляционный, спектральный, методы сглаживания и фильтрации, модели авторегрессии и скользящего среднего и т. д. [4–6].

Сингулярный метод анализа временных рядов «Гусеница» получил широкое распространение для разных задач [7–10]. При разложении исследуемых рядов на компоненты используется модель, согласно которой любой временной ряд можно представить в виде суммы сигналов разной периодичности и амплитуды колебаний и извлечь из данных необходимую информацию для реконструкции и прогноза атмосферных параметров и условий годичного прироста деревьев. При ис-

пользовании сингулярного спектрального метода приходится сталкиваться с проблемой произвольного подбора исходных данных для прогноза, в частности числа компонент для базового ряда. Сингулярный спектральный анализ не дает аналитического представления компонент разложения [11].

Цель статьи показать выделением тригонометрической составляющей возможную делимость на компоненты исследуемых временных рядов [12, 13], а также получить аналитические выражения этих составляющих.

Модельное прогнозирование дает реалистичный результат только при максимальном приближении суммы компонент к исходному ряду. Достоверность прогноза зависит также от продолжительности ряда: чем длиннее ряд, тем больше промежутков времени с достоверным прогнозом [14].

Исходные временные ряды содержат детерминированную и случайную составляющие. Детерминированная (базовая) составляющая ряда может быть также разделена на компоненты:

- тенденция временного ряда;
- периодические внутригодовые колебания – сезонная компонента;
- регулярные циклические колебания относительно главного тренда с иным периодом, нежели сезонные колебания. Например, изменение температуры в течение дня, недели, месяца при наблюдении ее в некоторой местности в течение нескольких лет.

Случайная компонента в этой задаче более созвучна понятию шум в радиотехнике. Помехи (погрешности в структуре древесины, погрешности измерений, высокочастотные составляющие) искажают прогноз. В статье рассматриваются ряды характеристик засушливости климата (индекс аридности де Мартона–ИМ), общего содержания озона (ОСО, ТОС) и плотности годовичных колец хвойных деревьев территории альпийского хребта в Европе. Все рассматриваемые временные ряды содержат двухгодовичную квазипериодическую составляющую, которая была удалена из данных сглаживанием FFT-фильтром.

#### Постановка задачи

Швейцарские Альпы являются наиболее информативной областью для изучения влияния ОСО (УФ-В) на плотность годовичных колец хвойных деревьев по репрезентативным рядам инструментальных наземных и спутниковых наблюдений. Подробное описание данных приведено в статье [15].

Для того чтобы определить зону однородности пространственных изменений общего содержания озона вокруг находящейся в центре обсерватории Ароза, между временными рядами общего содержания озона ОСО были рассчитаны корреляционные функции. Использовались данные реанализа спутникового зондирования ОСО в течение 40 последних лет (TEMIS). Синхронность временных рядов ОСО в диапазоне ( $46,5^\circ \pm 7^\circ$  с.ш. и  $9^\circ \pm 3^\circ$  в.д.), оценивалась по значениям пространственно-временной корреляции  $R=0,99-0,96$  [15]. Ряды среднемесячных температур и количества осадков в Швейцарии также можно отнести к однородным временным рядам [16]. Наземные и спутниковые данные хорошо согласуются [17].

В анализе временных рядов тригонометрическими составляющими  $TR(t)$  временного ряда являются:

- сезонная компонента  $S(t)$ ;
- циклическая компонента  $C(t)$ .

Сезонная составляющая  $S(t)$  показывает регулярность (циклическость) развития явления в течение некоторого периода времени. Причины сезонных колебаний в дендрохронологических данных связаны с природно-климатическими условиями. Иногда сезонность выражена отчетливо, в этом случае нет необходимости доказывать ее наличие.

Циклическая составляющая показывает плавные существенные колебания значений временного ряда. Период колебания циклической компоненты больше, чем сезонной, вот почему следует различать эти составляющие. В силу того, что эти колебания носят регулярный характер, они не могут быть отнесены к

случайной компоненте. Циклическая компонента  $C(t)$  отражает повторяемость процесса в течение продолжительного промежутка времени.

Анализ автокорреляционной функции временного ряда дает возможность оценить наличие тригонометрической компоненты.

В общем случае при исследовании временного ряда выделяют несколько составляющих:

$$U_t = y_t + S_t + C_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $U_t$  – наблюдаемое значение ряда;  $y_t$  – тренд (систематическая составляющая, плавно меняющаяся с течением времени);  $S_t$  – сезонная составляющая временного ряда;  $C_t$  – циклическая составляющая;  $\varepsilon_t$  – случайная составляющая, в которую входят и шумы, и неточности измерений, и т. д. Это аддитивная модель временного ряда. Однако по очевидным причинам можно предположить, что влияние сезонности носит мультипликативный характер [18]. И тогда получаем следующую модель временного ряда:

$$U_t = y_t S_t + C_t + \varepsilon_t. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) позволяют моделировать циклические закономерности исследуемых временных рядов.

В нашем исследовании рассматривается аддитивная модель временного ряда вида:

$$U_t = y_t + Tr_t + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где  $U_t$  – наблюдаемое значение ряда;  $y_t$  – по-прежнему тренд;  $Tr_t$  – тригонометрическая составляющая;  $\varepsilon_t$  – случайная компонента.

Для получения тригонометрической составляющей воспользуемся низкочастотной фильтрацией периодической функции  $Tr(t)$ . Так как значения временного ряда заданы в дискретные моменты времени, то интегралы, входящие в коэффициенты  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  тригонометрического ряда Фурье, определяющего  $Tr(t)$ , заменим на соответствующие суммы. Таким образом, оценку тригонометрической компоненты будем искать в виде:

$$\hat{Tr}(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) + \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) + a_{\frac{n}{2}},$$

где

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - y_i), \quad a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - y_i) \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i\right),$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - y_i) \sin\left(\frac{2\pi k}{n} i\right)$$

$$\text{и } a_{\frac{n}{2}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-1)^i (U_i - y_i). \quad (4)$$

Здесь  $n$  – это длина ряда;  $T$  – длина промежутка интегрирования.

Итак, пусть  $x(t)$  есть некоторый случайный процесс, наблюдаемые значения которого имеют вид (3).



Задача заключается в выделении тригонометрической составляющей, при условии, что тренд временного ряда известен. Для анализа моделей полученной тригонометрической составляющей используются данные реальных измерений – временные ряды максимальной плотности годовых колец, изменений индексов аридности де Мортон и общего содержания озона.

#### Выделение тригонометрической составляющей временного ряда плотности годовых колец

Рассмотрим временной ряд, представляющий собой региональную хронологию изменений максимальной плотности годовых колец (ПГК) для территории Альпийского хребта Франции и Швейцарии. В работе [13] выделен тренд этого временного ряда вида:  $y(t)=0,7863\ln(t)-5,9426$ . Для этого ряда коэффициенты (4) будут иметь вид:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i - \frac{0,7863 \ln n}{n} - 5,9426,$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i\right) + \frac{0,7863}{\pi k} \left( Si(2\pi k) - Si\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right),$$

где  $Si(x)$  есть интегральный синус,

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n U_i \sin\left(\frac{2\pi k}{n} i\right) - \frac{0,7863}{\pi k} \left( ci(2\pi k) - ci\left(\frac{2\pi k}{n}\right) - \ln n \right),$$

где  $ci(x)$  есть интегральный косинус [19] и

$$a_{\frac{n}{2}} = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-1)^i U_i - \frac{0,7863 \ln n}{n}, & \text{если } n - \text{четное,} \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-1)^i U_i + \frac{0,7863 \ln n}{n} + \frac{5,9426}{n}, & \text{если } n - \text{нечетное.} \end{cases}$$

Вычислив представленные коэффициенты в явном виде, получим тригонометрическую составляющую ряда ПГК:

1)  $n$  четное

$$\begin{aligned} \hat{T}r(t) = & \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} U_{2i} - 0,7863 \left( \frac{\ln n!}{n} + \frac{\ln n}{n} \right) - 5,9426 + \\ & + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i - \frac{2\pi k}{T} \tau\right) + \\ & + \frac{0,7863}{\pi} \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} \frac{1}{k} \left\{ \left( Si(2\pi k) - Si\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right) \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \right. \\ & \left. - \left( ci(2\pi k) - ci\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right) \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) \right\} + \\ & + \frac{0,7863}{\pi} \ln n \left( Si\left(\frac{(n-2)\pi\tau}{T}\right) - Si\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right) \right), \end{aligned}$$

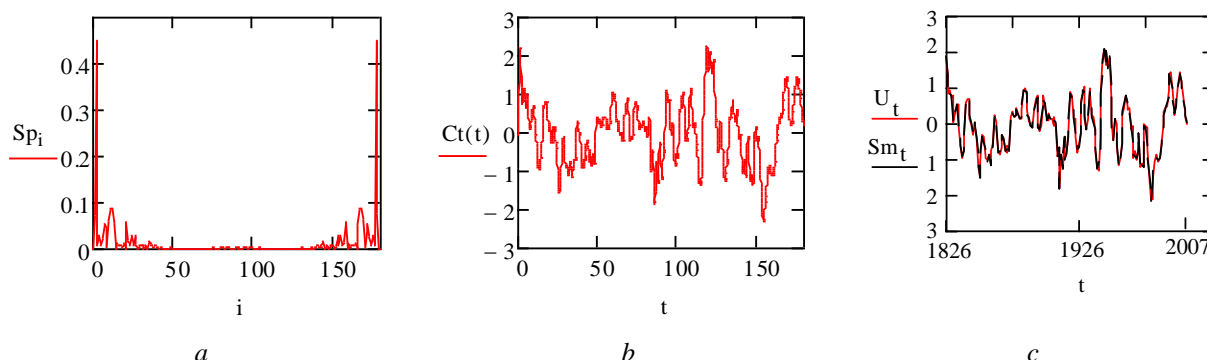
где  $Si(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt$  есть интегральный синус, а

$ci(x) = -\int_x^{+\infty} \frac{\cos t}{t} dt$  есть интегральный косинус.

2)  $n$  нечетное

$$\begin{aligned} \hat{T}r(t) = & \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} U_{2i} + 0,7863 \left( \frac{\ln n}{n} + \ln n! \right) + 5,9426 \left( \frac{1}{n} - 1 \right) + \\ & + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i - \frac{2\pi k}{T} \tau\right) + \\ & + \frac{0,7863}{\pi} \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \frac{1}{k} \left\{ \left( Si(2\pi k) - Si\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right) \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \right. \\ & \left. - \left( ci(2\pi k) - ci\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right) \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) \right\} - \\ & - \frac{0,7863}{\pi} \ln n \left( Si\left(\frac{(n-2)\pi\tau}{T}\right) - Si\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right) \right). \end{aligned}$$

Для исследования частотной структуры временного ряда используют такой параметр, как спектральная плотность мощности, которая интерпретируется как распределение среднего квадрата амплитуды процесса по частотам [20].



**Рис. 1.** а) дискретный спектр мощности временного ряда ПГК,  $i$  – номер гармоники; б) график функции  $\hat{T}r(t)$ ; в) график плотности годовых колец за период с 1826 по 2007 гг. ( $U_t$ ) и функции, аппроксимирующей его, которая представляет собой сумму тренда и тригонометрической составляющей ( $Sm_t$ )

**Fig. 1.** а) discrete power spectrum of MXD time series,  $i$  is the harmonic number; б) graph of function  $\hat{T}r(t)$ ; в) graph of the density of annual rings for the period from 1826 to 2007 ( $U_t$ ) and the function approximating it, which is the sum of the trend and trigonometric component ( $Sm_t$ )

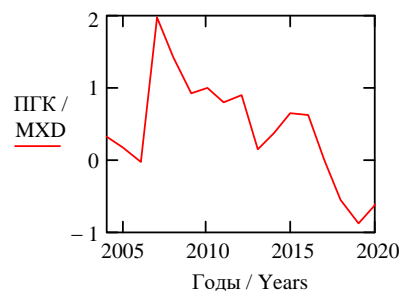
Используя выделенную тригонометрическую составляющую и ранее представленный тренд плотности годовых колец с 1826 по 2007 гг., получим прогнозные значения плотности на период времени с 2008 по 2020 гг.

**Таблица 1.** Прогнозируемые значения плотности годовых колец

**Table 1.** Predicted values of density of annual rings

Годы Years	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Исходные данные Original data	0,33077000	0,18170000	-0,01315000	-0,03386784	Данные не найдены Data not found												
Прогнозные значения Forecasted values	0,332	0,16	-0,084	-0,021	-0,172	0,44	0,655	0,825	-0,069	-0,125	-0,079	0,808	0,754	0,548	0,125	0,164	0,232

В качестве исходных данных использовалась вся имеющаяся совокупность с 1826 по 2007 гг. Прогнозные значения, полученные с помощью выделения тригонометрической составляющей и тренда, строились на промежутке с 2004 по 2020 гг. Графическое представление прогнозных значений, полученных путем выделения тригонометрической составляющей и тренда, приведено на рис. 2.



**Рис. 2.** Графическое представление прогнозируемого уровня плотности годовых колец на период с 2008 по 2020 гг. методом выделения тригонометрической составляющей и тренда

**Fig. 2.** Graphical representation of the predicted density level of annual rings for the period from 2008 to 2020 by the method of selection of trigonometric component and trend

Из анализа рис. 1, с заключаем, что получено достаточно хорошее представление тригонометрической составляющей и, соответственно, более точно описан исходный временной ряд. Сумма квадратов отклонений между исходными значениями ряда и

модельными равна 0,099. Для проверки точности модели найдем среднюю абсолютную точность модели

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_i - Sm_i| = 0,034. \text{ Здесь } Sm_i - i\text{-е смоделированное значение.}$$

Рассмотрим еще одну характеристику точности модели, такую как среднеквадратическая ошибка

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - Sm_i)^2 = 0,001396.$$

Такое значение можно считать приемлемой мерой точности модели. Проверка адекватности модели может быть выполнена с помощью критерия Стюдента или критерия Фишера, однако и в одном и другом случае должно выполняться условие, что анализируемые выборки извлекаются из нормально распределенной генеральной совокупности. Поэтому первое, что следует сделать, – это проверить на нормальность выборки. Для этого воспользуемся  $\chi^2$ -критерием Пирсона. Находим значение наблюдаемой статистики  $\chi^2 = 14,48352$  и число степеней свободы  $df = 9$ . Тогда для уровня значимости  $\alpha = 0,1$  находим критическое значение  $\chi^2_{0,1;9} = 14,7$ . Так как  $\chi^2 < \chi^2_{0,1;9}$ , гипотеза о нормальности распределения согласуется с опытными данными. Для проверки адекватности построенной модели воспользуемся  $F$  критерием Фишера. Для этого найдем наблюдаемое значение критерия  $F_{\text{факт.}} = 2,862$  и по таблице найдем критическую точку  $F_{\text{крит.}}(0,05; 90; 90) = 1,683$ . Так как  $F_{\text{факт.}} > F_{\text{крит.}}$ , то полученная модель статистически значима.

#### Выделение тригонометрической составляющей временного ряда индексов аридности де Мортон

Рассмотрим временной ряд, представляющий собой хронологию изменений индексов аридности де Мортон (ИМ), тренд которого выделен в [13] в виде:  $y(t) = -0,016t + 48,27$ . Для этого ряда коэффициенты (4) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i + 0,008n - 48,262, \\ a_k &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i\right) + 0,064, \\ b_k &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n U_i \sin\left(\frac{2\pi k}{n} i\right) - 0,064 \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi k}{n}\right) \\ \text{и } a_{\frac{n}{2}} &= \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-1)^i U_i + \frac{(-1)^n 0,016 \ln n}{n} \left[ \frac{n+1}{2} \right], & \text{если } n - \text{четное,} \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-1)^i U_i + \frac{(-1)^n 0,016 \ln n}{n} \left[ \frac{n+1}{2} \right] + \frac{48,27}{n}, & \text{если } n - \text{нечетное.} \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь  $[x]$  обозначает целую часть числа  $x$ . Тогда тригонометрическая составляющая ряда индексов аридности де Мортон будет иметь вид:

1)  $n$  четное

$$\hat{T}r(t) = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} U_{2i} + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i - \frac{2\pi k}{T} \tau\right) +$$

$$+0,064 \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \left\{ \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi k}{n}\right) \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) \right\} +$$

$$+0,008n - 48,262 + \frac{(-1)^n 0,016}{n} \left[ \frac{n+1}{2} \right];$$

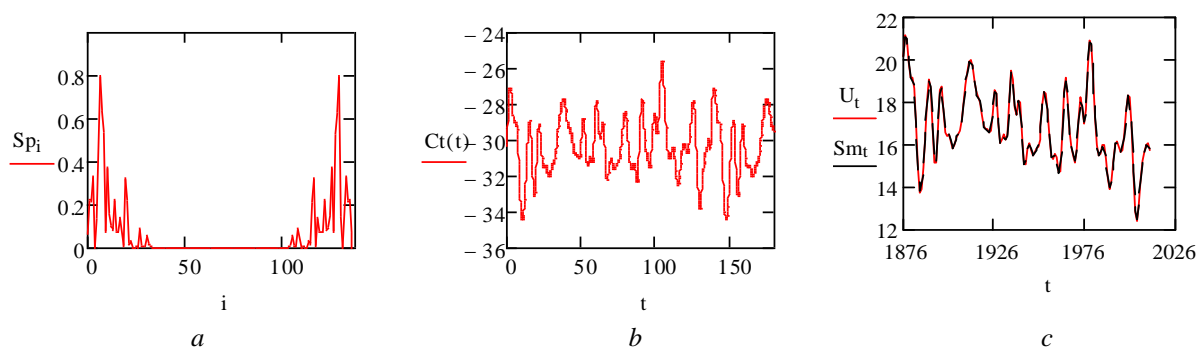
2)  $n$  нечетное

$$\hat{T}r(t) = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} U_{2i} +$$

$$+ \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i - \frac{2\pi k}{T} \tau\right) + \frac{48,27}{n} +$$

$$+0,064 \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \left\{ \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi k}{n}\right) \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) \right\} +$$

$$+0,008n - 48,262 + \frac{(-1)^n 0,016}{n} \left[ \frac{n+1}{2} \right].$$



**Рис. 3.** а) дискретный спектр мощности временного ряда индексов аридности де Мортонна (ИМ),  $i$  – номер гармоники; б) график функции  $\hat{T}r(t)$ ; в) график индексов аридности де Мортонна за период с 1876 по 2013 гг. ( $U_t$ ) и функции, аппроксимирующей его, которая представляет собой сумму тренда и тригонометрической составляющей ( $Sm_t$ )

**Fig. 3.** a) discrete power spectrum of time series of the De Martonne aridity index (IDM),  $i$  is the harmonic number; б) graph of function  $\hat{T}r(t)$ ; в) graph of the De Martonne aridity indexes for the period from 1876 to 2013 ( $U_t$ ) and the approximation function for it, which is the sum of the trend and trigonometric component ( $Sm_t$ )

**Таблица 2.** Прогнозируемые значения индексов аридности де Мортонна

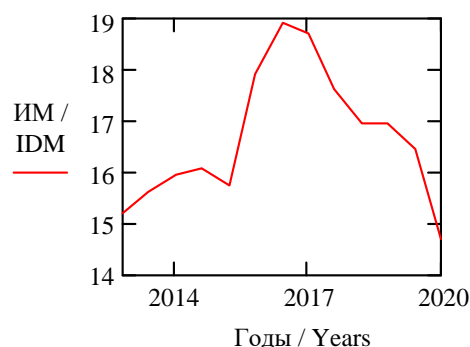
**Table 2.** Predicted values of the De Martonne aridity index

Годы Years	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Исходные данные Original data	15,21949645	15,62699628	15,98335186	16,10339618	15,74978083	15,30300039	15,982	16,975	16,575	13,708	11,927	Данные не найдены Data not found	
Прогнозные значения Forecasted values	15,203	15,611	15,967	16,087	15,734	17,924	18,933	18,695	17,612	16,965	16,96	16,441	14,719

Используя выделенную тригонометрическую составляющую и ранее предоставленный тренд индексов аридности де Мортонна с 1826 по 2013 гг., получим прогнозные значения плотности на период времени с 2014 г. по 2020 г. Эти значения представлены в табл. 2.

Для построения прогноза использовалась вся совокупность исходных данных с 1876 по 2013 гг. Про-

гнозные значения, полученные с помощью выделения тригонометрической составляющей и тренда, строились на промежутке с 2008 по 2020 гг. Жирным шрифтом в таблице выделены значения, которые не участвовали в построении тригонометрической компоненты и в нахождении тренда. Графическое представление прогнозных значений, полученных путем выделения тригонометрической составляющей и тренда, приведено на рис. 4.



**Рис. 4.** Графическое представление прогнозных значений индексов аридности де Мортонна на период с 2014 по 2020 гг. методом выделения тригонометрической составляющей и тренда

**Fig. 4.** Graph of the predicted values of the De Martonne aridity indexes for the period from 2014 to 2020 produced by the method of obtaining trigonometric component and trend

Из анализа рис. 3, заключаем, что получено достаточно хорошее представление тригонометрической составляющей и, соответственно, более точно описан исходный временной ряд. Сумма квадратов отклонений между исходными значениями ряда и модельными равна 6,906. Вычислив коэффициент детерминации ( $R^2=1$ ) [21], убеждаемся, что полученная кривая хорошо описывает исходные данные.

Для проверки точности модели найдем среднюю абсолютную точность модели  $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_i - Sm_i| = 0,124$ .

Здесь  $Sm_i$  –  $i$ -е смоделированное значение. Средняя абсолютная ошибка, равная 0,124 для наблюдаемых значений больше 10, является хорошим показателем точности. Для проверки того, что исходные данные имеют нормальное распределение, воспользуемся  $\chi^2$ -критерием Пирсона. Находим значение наблюдаемой статистики  $\chi^2=18,72363$  и число степеней свободы  $df=5$ . Тогда для уровня значимости  $\alpha=0,001$  находим критическое значение  $\chi^2_{0,001;4}=18,47$ . Так как  $\chi^2 < \chi^2_{0,001;4}$ , гипотеза о нормальности распределения согласуется с опытными данными. Для проверки адекватности построенной модели воспользуемся  $F$  критерием Фишера. Для этого найдем наблюдаемое значение критерия  $F_{\text{факт.}}=3,039$ , и по таблице найдем критическую точку  $F_{\text{крит.}}(0,05; 69; 69)=1,8583$ . Так как  $F_{\text{факт.}} > F_{\text{крит.}}$ , полученная модель статистически значима. То есть полученная модель точно и адекватно описывает исходные данные. Проверим, возможно ли эту же модель использовать для построения прогноза. Коэффициент корреляции между фактическими данными, которые не участвовали в построении модели, и найденными в соответствии с построенной моделью на промежутке 2014 и 2018 гг. равен  $r=0,77466$ . Это значение больше 0,7, что интерпретирует высокую точность модели. С другой стороны, вычислив среднюю относительную ошибку прогноза  $\bar{S}_{\text{отн}}=20,16936\%$ , из того, что  $\bar{S}_{\text{отн}} > 20\%$ , заключаем, что точность прогноза удовлетворительная.

#### Выделение тригонометрической составляющей временного ряда общего содержания озона

Рассмотрим временной ряд, представляющий собой хронологию изменений общего содержания озона (ОСО), тренд которого выделен в [13] в виде:  $y(t)=10+8t^{1,66}$ . Для этого ряда коэффициенты (4) будут иметь вид:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i - 10 - \frac{8}{n} (\zeta(1,66) - \zeta(1,66, n+1)),$$

где  $\zeta(s)$ ,  $s>1$  – дзета-функция Римана, а

$\zeta(s, v) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(v+k)^s}$ ,  $\text{Re } s>1$ ,  $v \neq 0, -1, -2, \dots$  – обобщенная дзета-функция Римана. Коэффициенты  $a_k$  равны

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i\right) - \frac{800}{33n} \times \left( -\frac{1}{n^{0,66}} + \cos\left(\frac{2\pi k}{n}\right) + \left(\frac{2\pi k}{n}\right)^{0,66} \times \right. \\ \left. \times \left[ S\left(\frac{2\pi k}{n}, 0,34\right) - S\left(\frac{2\pi k}{n}, 0,34\right) \right] \right),$$

где  $S(x, \alpha) = \int_x^{\infty} t^{\alpha-1} \sin t dt$ , ( $\text{Re } \alpha < 1$ ) есть синус – интеграл Френеля. Коэффициенты  $b_k$  равны

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n U_i \sin\left(\frac{2\pi k}{n} i\right) - \frac{800}{33n} \times \left( \sin\left(\frac{2\pi k}{n}\right) + \left(\frac{2\pi k}{n}\right)^{0,66} \times \right. \\ \left. \times \left[ C\left(\frac{2\pi k}{n}, 0,34\right) - C\left(\frac{2\pi k}{n}, 0,34\right) \right] \right),$$

где  $C(x, \alpha) = \int_x^{\infty} t^{\alpha-1} \cos t dt$ , ( $\text{Re } \alpha < 1$ ) – обобщенный косинус – интеграл Френеля. Коэффициент  $a_{\frac{n}{2}}$  равен:

$$a_{\frac{n}{2}} = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-1)^i U_i + \\ + \frac{8}{n} \left\{ \left( \frac{1}{2^{0,66}} - 1 \right) \zeta(1,66) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2^{0,66}} \zeta\left(1,66, \frac{n}{2} + 1\right) + \zeta(1,66, n+1) \right\}, \\ n - \text{четное}, \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-1)^i U_i + \\ + \frac{8}{n} \left\{ \left( \frac{1}{2^{0,66}} - 1 \right) \zeta(1,66) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2^{0,66}} \zeta\left(1,66, \frac{n}{2} + 1\right) + \zeta(1,66, n+1) \right\} + \frac{10}{n}, \\ n - \text{нечетное}. \end{cases}$$

Тогда тригонометрическая составляющая ряда общего содержания озона будет иметь вид:

1)  $n$  четное

$$\hat{T}r(t) = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} U_{2i} + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i - \frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \\ - \frac{800}{33n} \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}} \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i - \frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \frac{800}{33n} \times \\ \times \left( \left[ S\left(\frac{2\pi k}{n}, 0,34\right) - \right. \right. \\ \left. \left. - S\left(\frac{2\pi k}{n}, 0,34\right) \right] \times \right. \\ \times \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}} \left( \frac{2\pi k}{n} \right)^{0,66} \times \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) + \\ \left. \left[ C\left(\frac{2\pi k}{n}, 0,34\right) - \right. \right. \\ \left. \left. - C\left(\frac{2\pi k}{n}, 0,34\right) \right] \right] \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) + \\ + \frac{800}{33n^{1,66}} \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}} \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \\ - \frac{1}{2^{0,66}} \left( \frac{8}{n} \zeta(1,66) + \zeta\left(1,66, \frac{n}{2} + 1\right) \right),$$

2)  $n$  нечетное

$$\begin{aligned} \hat{T}r(t) = & \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} U_{2i} + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \sum_{i=1}^n U_i \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i - \frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \\ & - \frac{800}{33n} \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \cos\left(\frac{2\pi k}{n} i - \frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \frac{800}{33n} \times \\ & \times \left( \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \left( \frac{2\pi k}{n} \right)^{0,66} \times \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) + \left[ \begin{aligned} & S(2\pi k, 0, 34) - \\ & - S\left(\frac{2\pi k}{n}, 0, 34\right) \end{aligned} \right] \times \left[ \begin{aligned} & C\left(\frac{2\pi k}{n}, 0, 34\right) - \\ & - C(2\pi k, 0, 34) \end{aligned} \right] \right) \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) + \\ & + \frac{800}{33n^{1,66}} \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \tau\right) - \\ & - \frac{1}{2^{0,66}} \left( \frac{8}{n} \zeta(1, 66) + \zeta\left(1, 66, \frac{n}{2} + 1\right) \right) + \frac{10}{n}. \end{aligned}$$

Используя выделенную тригонометрическую составляющую и ранее предоставленный тренд общего содержания озона с 1932 по 2010 гг., получим прогнозные значения озона на период времени с 2011 по 2020 гг. Эти значения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Прогнозируемые значения общего содержания озона

Table 3. Predicted values of the total ozone content

Годы Years	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Исходные данные Original data	324,45293715	324,21411266	323,50016667	321,99105344	<b>345,0</b>	<b>315,0</b>	<b>317,0</b>	<b>336,0</b>	<b>331,0</b>	<b>323,0</b>	<b>325,0</b>	<b>318,0</b>	Данные не найдены Data not found	
Прогнозные значения Forecasted values	324,453	324,214	323,5	321,991	340,449	341,506	341,475	340,269	339,062	339,655	342,934	347,702	351,146	350,82

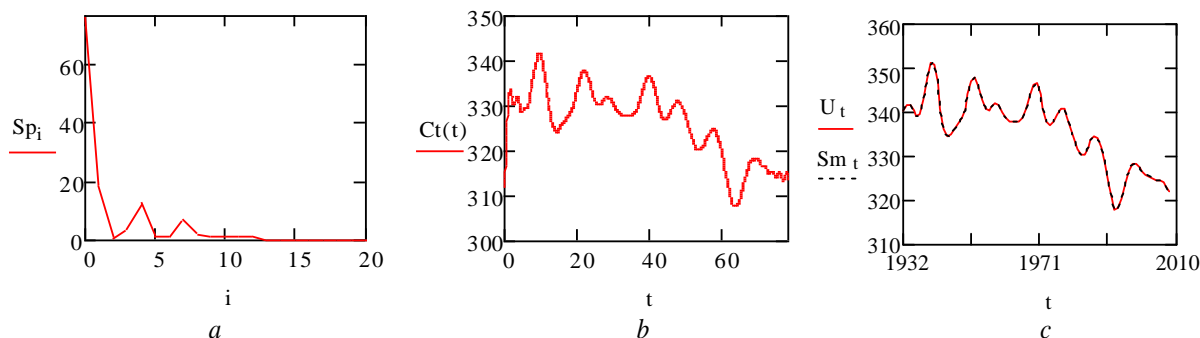


Рис. 5. а) Дискретный спектр мощности временного ряда общего содержания озона (ОСО),  $i$  – номер гармоники; б) график функции  $\hat{T}r(t)$ ; в) график общего содержания озона за период с 1932 по 2010 гг. ( $U_t$ ) и функции, аппроксимирующей его, которая представляет собой сумму тренда и тригонометрической составляющей ( $Sm_t$ )

Fig. 5. a) discrete power spectrum of time series of the total ozone content (TOC),  $i$  is the harmonic number; b) graph of function  $\hat{T}r(t)$ ; c) graph of the total ozone content for the period from 1932 to 2010 ( $U_t$ ) and the approximation function for it, which is the sum of the trend and trigonometric component ( $Sm_t$ )

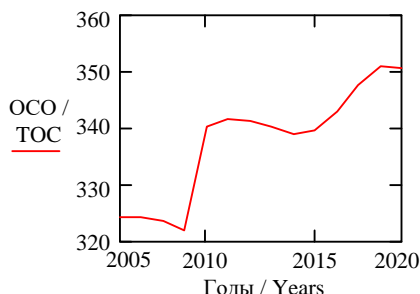


Рис. 6. Графическое представление прогнозируемого уровня озона на период с 2011 по 2020 гг. методом выделения тригонометрической составляющей и тренда.

Fig. 6. Graph of the predicted values of the total ozone content for the period from 2011 to 2020 produced by the method of obtaining trigonometric component and trend

Для построения прогноза использовалась вся совокупность исходных данных с 1932 по 2010 гг. Прогнозные значения, полученные с помощью выделения тригонометрической составляющей и тренда, строились на промежутке с 2007 по 2020 гг. Жирным шрифтом в таблице выделены значения, которые не участвовали в построении тригонометрической компоненты и в нахождении тренда. Графическое представление прогнозных значений, полученных путем выделения тригонометрической составляющей и тренда, приведено на рис. 6.

Из анализа рис. 5, с заключаем, что получено достаточно хорошее представление тригонометрической составляющей и, соответственно, более точно описан исходный временной ряд. Сумма квадратов отклонений между исходными значениями ряда и модельными

равна  $3,967 \cdot 10^{-14}$ . Найдем среднюю абсолютную точность модели  $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_i - Sm_i| = 2,24 \cdot 10^{-8}$ . Для наблюдаемых значений больше 100 является хорошим показателем точности. Находим значение наблюдаемой статистики  $\chi^2 = 24,49858$  и число степеней свободы  $df=9$ . Тогда для уровня значимости  $\alpha=0,001$  находим критическое значение  $\chi^2_{0,001;9}=27,64$ . Так как  $\chi^2 < \chi^2_{0,001;9}$ , гипотеза о нормальности распределения согласуется с опытными данными. Для проверки адекватности построенной модели воспользуемся  $F$  критерием Фишера. Для этого найдем наблюдаемое значение критерия  $F_{\text{факт}}=6,523$ , и по таблице найдем критическую точку  $F_{\text{крит}}(0,05; 39; 39)=2,145$ . Так как  $F_{\text{факт}} > F_{\text{крит}}$ , то полученная модель статистически значима. Проверим, возможно ли эту же модель использовать для построения прогноза. Коэффициент корреляции между фактическими данными, которые не участвовали в построении модели, и найденными в соответствии с построенной моделью на промежутке 2011 и 2018 гг. равен  $r=-0,4512$ . Это значение по модулю попадает в интервал  $(0,3; 0,5)$ , что интерпретируется как удовлетворительная точность прогноза. С другой стороны, вычислив среднюю относительную ошибку прогноза  $S_{\text{отн}}=5,146936\%$ , из того, что  $S_{\text{отн}} < 10\%$ , заключаем, что точность прогноза высокая.

### Заключение

Характеристики годовых колец деревьев являются признанными биоиндикаторами как состояния окружающей среды, так и самого дерева. Современные процессы изменений окружающей среды протекают неравномерно и сложнее, чем в предыдущие

климатические эпохи [22]. Ускорение происходящих в природе климатических изменений усложняет процессы адаптации растений [15, 23]. Соответственно труднее получить и использовать биоиндикационную информацию.

Выделение тригонометрических составляющих в данных показало присутствие в них множества циклических компонент различной природы. В частности, хотя сами полученные модели хорошо описывают временной ряд по имеющимся данным, качество прогноза следует улучшить, прежде всего, введением в модель не одной тригонометрической компоненты, а нескольких, а также введением шумовой компоненты. Поэтому очередная задача, которую еще предстоит решить, – оценка соотношения остаточных и базовых компонент (степень приближения аппроксимирующего ряда к исходному) исследуемых процессов и определение количества компонент, достаточных для достоверного прогноза. Далее для уточнения достаточного числа компонент, обеспечивающего достоверный прогноз, необходимо будет сопоставить полученные результаты с прогнозированием методом «Гусеница».

Выделение тригонометрической составляющей в дендрохронологических и климатических данных дает возможность извлечь из данных необходимую информацию для прогноза условий годовичного прироста хвойных. Полученные тригонометрические компоненты вместе с выделенными ранее трендами временных рядов ПГК, индексов аридности де Мортон и общего содержания озона можно использовать для долгосрочного прогнозирования плотности древесины, для реконструкции и прогноза атмосферных характеристик.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. On the cause of recent variations in lower stratospheric ozone / M.P. Chipperfield, S. Dhomse, R. Hossaini, W. Feng, M.L. Santee, M. Weber, J.P. Burrows, J.D. Wild, D. Loyola, M. Coldewey-Egbers // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – V. 45. – P. 5718–5726. URL: <https://doi.org/10.1029/2018GL078071> (дата обращения 20.04.2020).
2. Chen G., Cheng Q. Cyclicity and persistence of Earth's evolution over time: Wavelet and fractal analysis // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – V. 45. – P. 8223–8230. URL: <https://doi.org/10.1029/2018GL078071> (дата обращения 20.04.2020).
3. Shih S., Sun F., Lee H. Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting // *Mach Learn.* – 2019. – V. 108. – P. 1421–1441. URL: <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05815-0> (дата обращения 20.04.2020).
4. Pan G., Li S., Zhu Y. A time–frequency correlation analysis method of time series decomposition derived from synchrosqueezed S transform // *Applied Sciences*. – 2019. – V. 9. – P. 777. URL: <https://doi.org/10.3390/app9040777> (дата обращения 20.04.2020).
5. Van Lear C.A. Time Series Analysis (ARIMA, Spectral Analysis). – 2015. URL: <https://doi.org/10.1002/9781118540190.wbeic092> (дата обращения 20.04.2020).
6. Han Jae Hyuk. Comparing models for time series analysis // *Wharton Research Scholars*. – 2018. – 162 p. URL: [https://repository.upenn.edu/wharton\\_research\\_scholars/162](https://repository.upenn.edu/wharton_research_scholars/162) (дата обращения 20.04.2020).
7. Zhornikova P., Golyandina N., Spirov A.V. Noise model estimation with application to gene expression // *Journal of Bioinformatics and Computational Biology*. – 2019. – V. 17. – № 2. URL: <https://doi.org/10.1142/S0219720019500094> (дата обращения 20.04.2020).
8. SeriesNet: a generative time series forecasting model / Z. Shen, Y. Zhang, J. Lu, J. Xu, G. Xiao // *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. – Rio de Janeiro, 2018. – P. 1–8.
9. Spectrum sensing for cognitive radio: State-of-the-art and recent advances / E. Axell, G. Leus, E.G. Larsson, H.V. Poor // *IEEE Signal Processing Magazine*. – 2012. – V. 29. – № 3. – P. 101–116.
10. Kalantari M., Hassani H. Automatic grouping in singular spectrum analysis // *Forecasting*. – 2019. – V. 1. – № 1. – P. 189–204.
11. Golyandina N., Korobeynikov A., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis with R. – Berlin: Springer, 2018. – 272 p.
12. Kashkin V.B., Rubleva T.V. A study of ozone anomaly of 2011 in the Northern Hemisphere based on aura satellite data // *Журнал СВУ. Техника и технологии*. 2017. – № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/a-study-of-ozone-anomaly-of-2011-in-the-northern-hemisphere-based-on-aura-satellite-data> (дата обращения: 20.04.2020).
13. Бондаренко С.Л., Устинова И.Г. Тренды климатических изменений в плотности годовых колец // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 50–59.
14. Langematz U. Stratospheric ozone: down and up through the anthropocene // *ChemTexts*. – 2019. – V. 5. – № 8. URL: <https://doi.org/10.1007/s40828-019-0082-7> (дата обращения: 20.04.2020).
15. Bondarenko S., Savchuk D. Response of conifers to UV-B and climate in mountain areas // *Global Journal of Environmental Science and Management*. – 2018. – V. 4 (3). – P. 299–314. DOI: 10.22034/GJESM.2018.03.004
16. Begert M., Schlegel T., Kirchhofer W. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000 // *Int. J. Climatol.* – 2005. – № 25. – P. 65–80. URL: <https://doi.org/10.1002/joc.1118> (дата обращения: 20.04.2020).



17. Zuev V.V. Reconstruction and prediction of long-period variations of the ozonosphere using ozonometric and dendrochronological data // *International Journal of Remote Sensing*. – 2005. – V. 26. – № 16. – P. 3631–3639. DOI: 10.1080/01431160500077051.
18. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
19. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. – М.: Наука, 1981. – 800 с.
20. Lifshits M.A., Peligrad M. On the spectral density of stationary processes and random fields // *Journal of Mathematical Sciences (United States)*. – 2016. – V. 219 (5). – P. 789–797. URL: <https://doi.org/10.1007/s10958-016-3147-9> (дата обращения: 20.04.2020).
21. Володин И.Н., Симушкин С.В. Лекции по теории вероятностей и математической статистике. – Казань: Казан. ун-т, 2019. – 347 с.
22. Elevation-dependent warming in global climate model simulations at high spatial resolution / E. Palazzi, L. Mortarini, S. Terzago, J. von Hardenberg // *Climate Dynamics*. – 2018. – V. 52. – P. 2685–2702. URL: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4287-z> (дата обращения: 20.04.2020).
23. Palomo I. Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: a literature review // *Mountain Research and Development*. – 2017 – V. 37 (2). – P. 179–187.

Поступила 06.05.2020 г.

#### Информация об авторах

**Устинова И.Г.**, кандидат технических наук, доцент школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Бондаренко С.Л.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук.

**Рожкова О.В.**, кандидат физико-математических наук, доцент школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.510:630\*561.24

## ANALYSIS OF TRIGONOMETRIC COMPONENTS OF TIME SERIES OF ENVIRONMENTAL MONITORING DATA

**Irina G. Ustinova<sup>1</sup>,**  
igu@tpu.ru

**Svetlana L. Bondarenko<sup>2</sup>,**  
bond\_sl@mail.ru

**Olga V. Rozhkova<sup>1</sup>,**  
rov@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
10/3, Akademicheskoye avenue, Tomsk, 634055, Russia.

**The relevance.** The forecast of the state of natural resources and climate change is always relevant, as well as the search for new mathematical approaches. Analysis of dendrochronological and climate time series provides important information for describing these series, understanding, and predicting the behavior of these series. Therefore, the relevance of the study is caused not only by the need to predict the growth of trees, forecasting environmental processes, climate in general, but also by the need to preserve forest zones and develop the forest industry as a whole.

**The main aim** of the research is to identify and use long-term trends and trigonometric components of the studied characteristics: the density of annual rings, changes in the total ozone content in the atmosphere and the De Martonne aridity index to assess climate change. The original time series are presented in additive form in analytical one.

**Objects** of the research are time series of the total ozone content in the atmosphere, density of annual rings and the De Martonne aridity index.

**Methods:** time series analysis, statistical analysis, F-criterion.

**Results.** The analysis of dendrochronological and climatic data for the presence of trigonometric components is produced. This made it possible to obtain information for the forecast of temperature, precipitation, ultraviolet-B radiation, etc. Analytical expressions for trigonometric components of maximum density of annual rings, total ozone content, De Martonne aridity index are obtained. The combination of the trigonometric component and the trend allows us to obtain a reliable forecast of the conditions for the formation of annual rings and the density of wood. The resulting model will provide a prediction of the value of a variable (UV-B radiation, the maximum density of annual rings or the De Morton aridity index) at unobserved moments of time.

### Key words:

Time series, trend, trigonometric component, prediction, dendrochronological method.

### REFERENCES

1. Chipperfield M.P., Dhomse S., Hossaini R., Feng W., Santee M.L., Weber M., Burrows J.P., Wild J.D., Loyola D., Coldewey-Egbers M. On the cause of recent variations in lower stratospheric ozone. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, pp. 5718–5726. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018GL078071> (accessed 20 April 2020).
2. Chen G., Cheng Q. Cyclicity and persistence of Earth's evolution over time: Wavelet and fractal analysis. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, pp. 8223–8230. Available at: <https://doi.org/10.1029/> (accessed 20 April 2020).
3. Shih S., Sun F., Lee H. Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting. *Mach Learn*, 2019, vol. 108, pp. 1421–1441. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05815-0> (accessed 20 April 2020).
4. Pan G., Li S., Zhu Y. A time–frequency correlation analysis method of time series decomposition derived from synchrosqueezed S transform. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, pp. 777. Available at: <https://doi.org/10.3390/app9040777> (accessed 20 April 2020).
5. Van Lear C.A. *Time Series Analysis* (ARIMA, Spectral Analysis). 2015. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781118540190.wbeic092> (accessed 20 April 2020).
6. Han Jae Hyuk. Comparing models for time series analysis. *Wharton Research Scholars*, 2018, 162 p. Available at: [https://repository.upenn.edu/wharton\\_research\\_scholars/162](https://repository.upenn.edu/wharton_research_scholars/162) (accessed 20 April 2020).
7. Zhornikova P., Golyandina N., Spirov A.V. Noise model estimation with application to gene expression. *Journal of Bioinformatics and Computational Biology*, 2019, vol. 17, no. 2. Available at: <https://doi.org/10.1142/S0219720019500094> (accessed 20 April 2020).
8. Shen Z., Zhang Y., Lu J., Xu J., Xiao G. SeriesNet: a generative time series forecasting model. *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Rio de Janeiro, 2018. pp. 1–8.
9. Axell E., Leus G., Larsson E.G., Poor H.V. Spectrum sensing for cognitive radio: State-of-the-art and recent advances. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, vol. 29, no. 3, pp. 101–116.
10. Kalantari M., Hassani H. Automatic grouping in singular spectrum analysis. *Forecasting*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 189–204.
11. Golyandina N., Korobeynikov A., Zhigljavsky A. *Singular spectrum analysis with R*. Berlin, Springer, 2018. 272 p.
12. Kashkin V.B., Rubleva T.V. A study of ozone anomaly of 2011 in the Northern Hemisphere based on aura satellite data. *Equipment and technologies*, 2017, no 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/a-study-of-ozone-anomaly-of-2011-in-the-northern-hemisphere-based-on-aura-satellite-data> (accessed 20 April 2020).
13. Bondarenko S.L., Ustinova I.G. Trends of climatic changes in density of year rings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. GeoAssets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 50–59. In Rus.
14. Langematz U. Stratospheric ozone: down and up through the anthropocene. *ChemTexts*, 2019, vol. 5, no. 8. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40828-019-0082-7> (accessed 20 April 2020).
15. Bondarenko S., Savchuk D. Response of conifers to UV-B and climate in mountain areas. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 299–314. DOI: 10.22034/GJESM.2018.03.004

16. Begert M., Schlegel T., Kirchhofer W. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *Int. J. Climatol.*, 2005, no. 25, pp. 65–80. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.1118> (accessed 20 April 2020).
17. Zuev V.V. Reconstruction and prediction of long-period variations of the ozonosphere using ozonometric and dendrochronological data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, vol. 26, no. 16, pp. 3631–3639. DOI: 10.1080/01431160500077051).
18. Kendall M.G., Stuart A. *Mnogomerny statistichesky analiz i vremennye ryady* [Multivariate statistical analysis and time series]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 736 p.
19. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Integraly i ryady* [Integrals and series]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 800 p.
20. Lifshits M.A., Peligrad M. On the spectral density of stationary processes and random fields. *Journal of Mathematical Sciences*, 2016, vol. 219, no. 5, pp. 789–797. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10958-016-3147-9> (accessed 20 April 2020).
21. Volodin I.N., Simushkin S.V. *Lektsii po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike* [lectures in the probability theory and mathematical statistics]. Kazan, Kazan University Publ., 2019. 347 p.
22. Palazzi E., Mortarini L., Terzago S., Von Hardenberg J. Elevation-dependent warming in global climate model simulations at high spatial resolution. *Climate Dynamics*, 2018, vol. 52, pp. 2685–2702. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4287-z> (accessed 20 April 2020).
23. Palomo I. Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: a literature review. *Mountain Research and Development*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 179–187.

Received: 06 May 2020.

#### Information about the authors

**Irina G. Ustinova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Svetlana L. Bondarenko**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Olga V. Rozhkova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 66.081+556

## ВЫДЕЛЕНИЕ ЛИТИЯ НА СОРБЕНТАХ ТОКЕМ-160 И AMBERLITE IR-120 ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Попов Григорий Васильевич,  
Popov.G.V @yandex.ru

Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, Петропавловск-Камчатский, 683002, г. Петропавловск-Камчатский, Северо-восточное шоссе, 30, а/я 56.

*В настоящее время на Камчатских геотермальных месторождениях не производится промышленное извлечение лития из природных растворов. Актуальность исследования заключается в изучении сорбционного способа извлечения лития из отработанного геотермального теплоносителя. Литий является одним из стратегических металлов для промышленности. Природный теплоноситель содержит в своем составе редкие и рассеянные элементы, которые можно получать при сорбционной очистке. Комплексное использование геотермальных ресурсов – перспективное направление в освоении геотермальной энергии Камчатского края. Получение ценных компонентов увеличит продуктивность использования тепловой энергии недр Земли.*

**Цель:** установить параметры сорбционного процесса промышленных органических сорбентов (ТОКЕМ-160 и AMBERLITE IR-120) по отношению к ионам лития в динамических условиях.

**Метод.** Исследования проводили в статических условиях из модельных и рабочих растворов при постоянном перемешивании. Сорбционные процессы в динамическом режиме проводили при комнатной температуре, используя модельный раствор. Содержание ионов лития определяли высокоэффективной жидкостной хроматографией на хроматографе «Shimadzu».

**Результаты.** Определены константы скорости сорбционного процесса. На основании экспериментальных исследований извлечения лития из модельных растворов установлены общие закономерности сорбции, коэффициенты защитного действия и высота работающего слоя для промышленных катионитов ТОКЕМ-160 и AMBERLITE IR-120, а также динамическая адсорбционная емкость сорбентов. Разработаны рекомендации по применению катионообменных смол для комплексной переработки отработанного теплоносителя. Представлен микрокомпонентный состав проб теплоносителей Камчатского края до и после сорбции.

### Ключевые слова:

Сорбция, литий, промышленные сорбенты, извлечение, геотермальный теплоноситель, Паратунское месторождение термальных вод, Паужетское геотермальное месторождение.

### Введение

Литий является стратегически важным металлом, который применяют во многих отраслях промышленности [1–5]. Минеральные ресурсы лития с каждым годом истощаются, поэтому существует необходимость в поиске альтернативных источников лития. Такими являются рассолы, озера, морская вода и природные растворы. К перспективным источникам лития относят геотермальный теплоноситель [1, 2, 6–8]. В последние годы природный теплоноситель нашел широкое применение в получении не только лития, но и других ценных компонентов в ряде зарубежных стран [9, 10]. В настоящее время к способам извлечения лития из гидроминерального сырья относят электрохимические, с применением селективных катодов и мембранных сит, сорбцию селективными ионообменными смолами, экстракцию, флотацию и многие другие. Гибридный емкостный способ деионизации применяли для извлечения ионов лития из геотермальной воды карпатского региона Польши [2]. Использовались селективный катод и анод с активированным углем, покрытый анионообменной мембраной. Степень извлечения составляла 73 %. Электролиз был применен для выделения лития из рассолов с высоким содержанием магния [6]. Мембранную емкостную деионизацию использовали в качестве эффективной технологии селективного получения лития [11]. Предложенная технология отличается низким энергопотреблением и является экологически

чистой. Ионно-ситовой оксид марганца  $\text{HMnO}(\text{Mg})$  показал высокую селективность к ионам лития в присутствии щелочных металлов при  $\text{pH}=8$  [12]. Микропористый оксид марганца ( $\text{HMnO}$ ) использовали для извлечения лития из морской воды [13]. Сорбционная емкость составляла 7,9 мг/г. Два последовательных ионообменных способа применяли в работе [14]. Процесс состоял из удаления двухвалентных катионов и восстановления лития в виде карбоната с чистотой 99,9 %. Синтезированные материалы на основе оксидов титана и марганца [15] показали высокую степень извлечения в динамических условиях – 99 %, при оптимальном  $\text{pH}=10$ . Сорбцию цеолитами исследовали в работе [16]. Экстракция из растворов озер Кайдамского Бассейна изучена в [4]. Степень извлечения лития достигала 96 %. В работе [5] в качестве органических экстракторов были выбраны различные марки экстрагентов для изучения селективного извлечения лития из растворов в присутствии магния.

Анализ процессов и аппаратного оформления извлечения лития из природных растворов показывает, что наиболее эффективным является сорбционный способ [1, 3, 9, 15–18]. Перспективным для выделения лития является Паужетское месторождение парогидротерм и Паратунское месторождение термальных вод Камчатского края. Отсутствие достаточного количества источников потребления энергии, выработанной Паужетской геотермальной станцией (мощность 11 МВт), ведет к тому, что отсепарированный

теплоноситель в больших объемах сбрасывается на грунт и в руч. Быстрый [19]. Отработанный теплоноситель Паратунского месторождения, смешиваясь с хозяйственно-бытовыми сточными водами, сбрасывается в р. Паратунка. Для устранения экологических проблем химического загрязнения водных объектов (рыбохозяйственного назначения) предложена технологическая схема извлечения бора и лития [20]. Исследовательские работы по извлечению лития из модельных растворов [21] и теплоносителей Паужетского и Паратунского месторождений [22] показали возможность применения промышленных сорбентов для снижения концентраций катионов. Лабораторные исследования показали установления сорбционного равновесия в течение 2–3 часов.

#### Материалы и методы исследования

Для сравнения сорбционной способности по отношению к ионам лития были выбраны два промышленных катионита – ТОКЕМ-160 и AMBERLITE IR-120. Ионообменные смолы находились в  $H^+$ -форме. Зерна сферической формы имели размер: ТОКЕМ-160 – 0,4–1,25 мм; AMBERLITE IR-120 – 0,65–0,85 мм. Массовая доля железа в катионитах не превышала 0,03 %.

В качестве рабочего раствора при сорбции в статических условиях использовали теплоноситель Паужетского геотермального месторождения (скважина 103) и Верхне-Паратунского месторождения термальных вод (скважина 88) из скважин с максимальными содержаниями лития в пробах. Соотношение Т:Ж составляло 1:50. Анализ проб воды на микрокомпонентный состав выполняли в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ФГБУ «ИМГРЭ») масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100/DRC и атомно-эмиссионным с индуктивно-связанной плазмой Optima 3300 по методике НСАМ № 480-X.

Сорбционные процессы в динамических условиях изучали с помощью сорбционной колонки с внутренним диаметром 15,4 мм и высотой 70 см. Модельные растворы готовили растворением навески  $LiCl \cdot H_2O$  (х.ч.) в дистиллированной воде. Сорбция лития не происходит мгновенно, и объем пропущенного раствора нелинейная зависимость от высоты слоя. Линейная же зависимость наступает после формирования сорбционного фронта и наступления параллельного переноса по слою сорбента. Ширину фронта сорбции экспериментально определяют по выходным кривым сорбции вещества при разной высоте слоя. Для получения разной высоты слоя в колонку загружали сорбенты, массой 3; 5 и 10 г. Модельный раствор пропускали через колонку с сорбентом с объемной скоростью 5–7  $см^3/мин$  при температуре 21 °С и отбирали фракции фильтрата 50  $см^3$ . Концентрацию ионов лития в пробах определяли на хроматографе «Shimadzu LC-20 AD».

#### Результаты и их обсуждение

Общие закономерности сорбции для промышленных органических сорбентов выявляли посредством математического моделирования [21]. Моделирование сорбции лития проводилось на катионитах ТО-

КЕМ-160 и AMBERLITE IR-120 из модельного раствора [21]. Лучше всего экспериментальные данные описывало уравнение сорбции Ленгмюра, что подтверждается работой [23]. Авторы описывали сорбцию лития из растворов, используя AMBERLITE IR-120. Результаты исследования сорбции на ионообменных смолах подробно изложены в [24, 25].

Найденное значение предельной сорбции ( $COE_{max}$ ) [21] было использовано для расчета удельной поверхности катионитов в соответствии с формулой [26]:

$$S_{уд} = COE_{max} \cdot N_A \cdot S_0,$$

где  $S_0$  – площадь, иона лития ( $м^2$ );  $N_A$  – число Авогадро,  $6,022 \cdot 10^{23}$  (моль $^{-1}$ ).

Расчет значений  $S_0$  производили по формуле [26]:

$$S_0 = \pi (R_{Li}^{гидр})^2,$$

где  $R_{Li}^{гидр}$  – гидратированный радиус иона лития, равный 0,34 нм;  $S_0 = 0,36 \cdot 10^{-18}$   $м^2$ ; удельные поверхности для ТОКЕМ-160 – 106,19  $м^2/г$ , для AMBERLITE IR-120 – 121,36  $м^2/г$ .

Для определения высоты работающего слоя катионита необходимо построить зависимость объема модельного раствора, пропущенного до проскока, от высоты слоя сорбента (рис. 1). Наиболее подходящей аппроксимирующей функцией является полином степени 6.

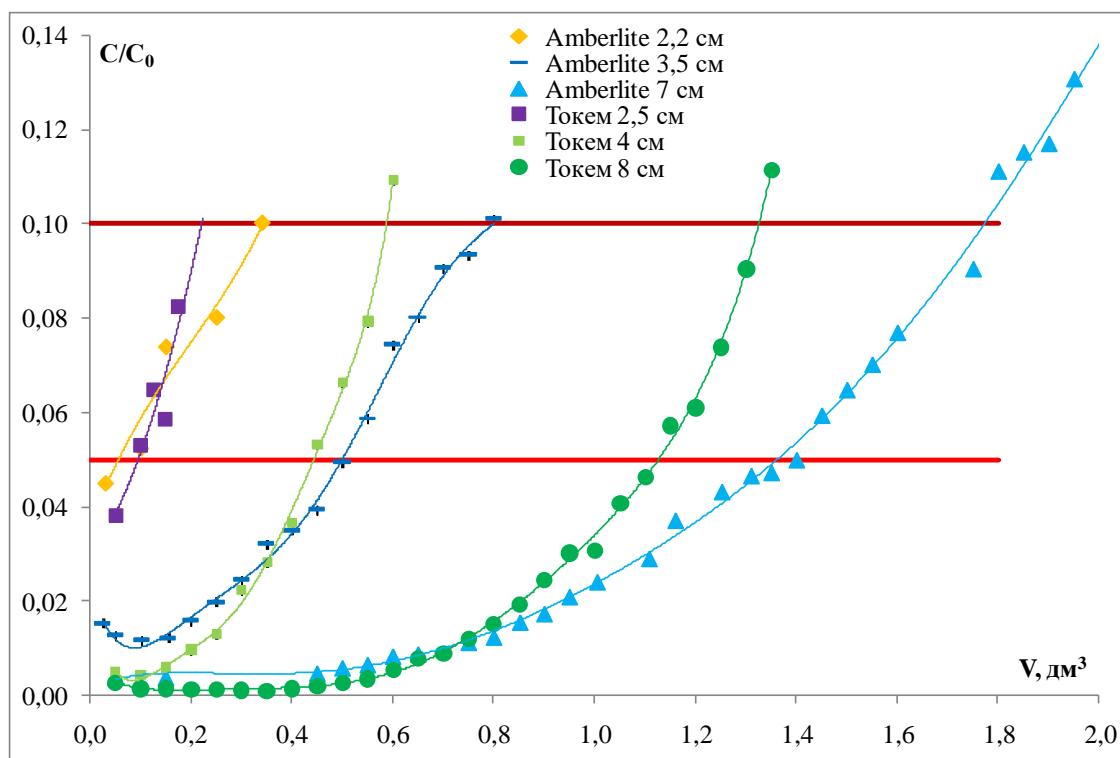
При заданной величине проскока 0,05 степень извлечения составляет 95 %, объем пропускаемой воды можно найти по рис. 1. При высоте слоя сорбента Amberlite IR-120 равной 2,2; 3 и 7 см объем фильтрата соответственно равен 0,06; 0,5 и 1,36 л. При степени извлечения 90 % объем фильтрата соответственно равен 0,34; 0,8 и 1,76 л. Для сорбента ТОКЕМ-160 объем фильтрата при степени извлечения 95 % и высоте слоя 2,5; 4 и 8 см соответственно равен 0,1; 0,44 и 1,13 л. При проскоке  $C/C_0 = 0,1$  объем пропущенного раствора равен 0,22; 0,59 и 1,33 л.

Чтобы определить коэффициент защитного действия и величину потери времени защитного действия, использовали уравнение Шилова, связывающее время защитного действия слоя сорбента ( $\tau$ ) с его высотой ( $L$ ) [26, 27]:

$$\tau = K \cdot (L - L_m) = K \cdot L - \tau_0,$$

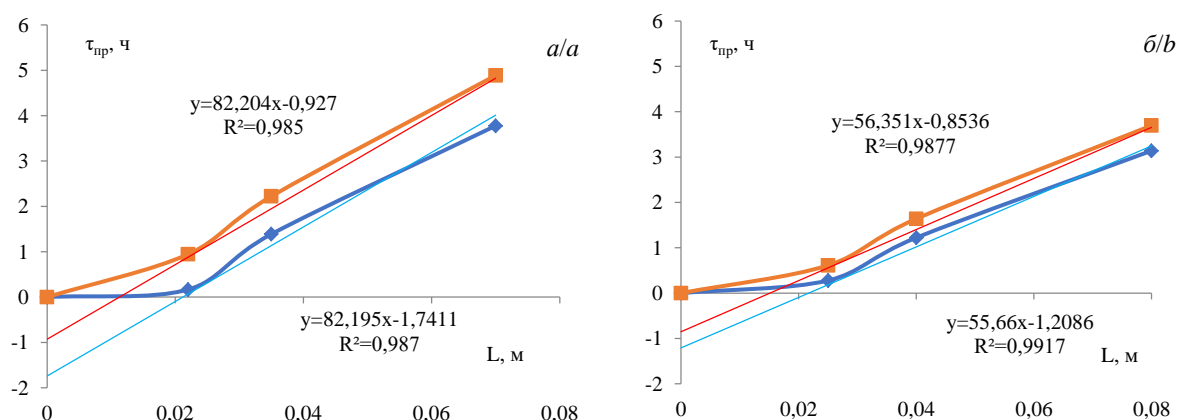
где  $K$  – коэффициент защитного действия слоя сорбента, ч/м;  $\tau_0$  – потеря времени защитного действия, ч;  $L_m$  – неотработанная высота слоя сорбента, м.

По полученным данным построена зависимость  $\tau$ – $L$  (рис. 2). Математическая обработка позволяет определить «мертвый слой» и работающий слой сорбента по касательной к полученной кривой. Величина отрезка от начала координат до точки пересечения касательной с осью абсцисс равняется неотработанной высоте слоя сорбента при заданном проскоке. В производстве эта высота не должна превышать 5–7 % от общей высоты сорбционного слоя в колонне [26, 27]. Следовательно, высота слоя в промышленном масштабе должна быть не менее 0,42 м для зарубежного катионита и отечественного сорбента при степени извлечения 95 % и не менее 0,2 и 0,28 м соответственно при степени извлечения 90 %. Найденные значения применимы при скорости потока 2 м/ч.



**Рис. 1.** Начальные участки выходных кривых сорбции лития из модельного раствора при разной высоте слоя ТОКЕМ-160 и Amberlite IR-120

**Fig. 1.** Initial sections of the output curves of lithium sorption from the model solution at different layer heights TOKEM-160 and Amberlite IR-120



**Рис. 2.** Зависимость времени защитного действия слоя Amberlite IR-120 (а) и ТОКЕМ-160 (б) от высоты слоя катионита

**Fig. 2.** Dependence of the time of the protective action of the layer Amberlite IR-120 (a) and TOKEM-160 (b) on the height of the cation exchanger layer

Величина  $\tau_0$  определяется как отрезок от начала координат до точки пересечения касательной с осью ординат. Коэффициент защитного действия слоя  $K$  равняется тангенсу угла наклона касательной.

Для расчета динамической адсорбционной емкости сорбента  $a_d$  (мг/дм³) по извлекаемому компоненту для заданных условий эксперимента использовали уравнение [26, 27]:

$$a_d = C_0 \cdot \omega_0 \cdot K,$$

где  $C_0$  – исходная концентрация раствора, мг/дм³;  $\omega_0$  – скорость потока, м/ч;

$$\omega_0 = V / (S \cdot \tau),$$

где  $V$  – объем фильтрата, м³;  $S$  – площадь фильтрации, м²;  $\tau$  – время фильтрации, ч.

Динамическую емкость сорбентов рассчитывали по формуле [26, 27]:

$$\text{ДЕС} = V \cdot (C_0 - C_{\text{пр}}) / m,$$

где  $C_{\text{пр}}$  – концентрация на выходе из колонки в момент проскока, мг/дм³;  $V$  – объем фильтрата в момент проскока, дм³;  $m$  – масса сорбента, г.



**Таблица 1.** Показатели процесса сорбции ионов лития из модельного раствора в динамических условиях, при скорости потока  $\omega_0=2$  м/ч и величине проскока  $C_{пр}/C_0=0,05$  и  $0,1$

**Table 1.** Indicators of lithium ions sorption from a model solution under dynamic conditions, at a flow rate of  $\omega_0=2$  m/h and a breakthrough value of  $C_{pr}/C_0=0,05$  and  $0,1$

Сорбент Sorbent	m, г/г	C <sub>0</sub> , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	C/C <sub>0</sub>	L	L <sub>0</sub>	L <sub>м</sub>	τ <sub>0</sub> , ч h	K, ч/м h/m	a <sub>д</sub> , г/дм <sup>3</sup> g/dm <sup>3</sup>	ДЕС/DEC, мг/г/mg/g
				M/m						
Amberlite IR-120	10	45	0,05	0,07	0,024	0,021	1,74	82	7,3	5,8
			0,1			0,010	0,93			7,1
Токем-160		72	0,05	0,08	0,028	0,021	1,21	56	8,1	7,7
			0,1			0,014	0,85			8,6

**Таблица 2.** Результаты анализа на микрокомпонентный состав проб природного геотермального теплоносителя Верхне-Паратунского месторождения термальных вод и Паужетского геотермального месторождения, мкг/дм<sup>3</sup>

**Table 2.** Results of analysis for the microcomponent composition of samples of natural geothermal coolant of the Verkhne-Paratunsky thermal water deposit and the Pauzhetzsky geothermal field, mcg/dm<sup>3</sup>

Определяемые показатели Defined indicators	скважина 88/well 88			скважина 103/well 103		
	До сорб- ции Before sorption	После сорбции (24 часа) After sorption (24 hours) Т:Ж (S:L)=1:50		До сорб- ции Before sorption	После сорбции (24 часа) After sorption (24 hours) Т:Ж (S:L)=1:50	
		ТОКЕМ-160	Amberlite-120		ТОКЕМ-160	Amberlite-120
Натрий Sodium	253000	46810	51630	>500000	368000	310000
Магний Magnesium	80	70	50	190	50	<50
Калий Potassium	7400	750	770	91000	21000	22000
Кальций Кальций	>50000	490	90	52000	350	490
Железо общ. Iron com.	<50	<50	<50	270	70	60
Стронций Strontium	930	1	<1	520	2	4
Литий Lithium	928	310	317	2810	1680	1760
Алюминий Aluminum	31	26	16	158	122	124
Хром общ. Chromium com.	5,9	2,7	2,7	8,7	<2,0	2,1
Марганец Manganese	7,0	0,9	0,5	23,0	4,5	5,0
Кобальт Cobalt	0,18	<0,10	<0,10	0,32	0,10	<0,10
Никель Nickel	4,2	<2,0	<2,0	4,3	3,2	2,4
Медь Copper	1,6	<2,0	<2,0	13,0	6,9	7,3
Цинк Zinc	5,4	8,3	6,3	48	25	27
Галлий Gallium	1,8	<0,2	<0,2	1,5	1,4	1,4
Германий Germanium	12	12	12	24	24	24
Мышьяк Arsenic	867	794	826	3410	3400	3380
Селен Selenium	<5,0	<5,0	<5,0	14	12	12
Рубидий Rubidium	33	2	2	437	88	100
Серебро Silver	<0,10	<0,10	<0,10	0,20	0,10	0,18
Сурьма Antimony	17	12	14	80	82	80
Цезий Cesium	27	1	1	298	53	59
Барий Barium	8,4	4	3	14,0	7,6	6,6
Вольфрам Tungsten	26	22	24	24	23	23
Таллий Thallium	0,05	<0,05	<0,05	2,20	0,23	0,25
Свинец Lead	<0,2	0,5	<0,2	1,20	0,77	3,33

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Результаты показывают, что отечественный катионит ТОКЕМ-160 имеет близкие значения динамической емкости сорбента в сравнении со значениями для зарубежного аналога AMBERLITE IR-120. Динамическая емкость для промышленных сорбентов составляет 40–90 % от статической обменной емкости. Полученные результаты сопоставимы со значениями, полученными в работе [23] (сорбционная емкость равнялась 20 мг/г). Полученные значения имеют такой же порядок, что и значения для литий-ионных сит на основе оксидов марганца [23].

Сорбция промышленными смолами была осуществлена из модельных растворов. При извлечении лития из природных растворов стоит учитывать многочисленные элементы реальных растворов. Природный теплоноситель Паратунского месторождения термальных вод и Паужетского геотермального месторождения содержит в своем составе многочисленные химические элементы, которые препятствуют селективному извлечению лития. Микрокомпонентный состав проб теплоносителя Верхне-Паратунского месторождения термальных вод и Паужетского геотермального месторождения до и после сорбции в статических условиях представлен в табл. 2.

Из таблицы видно, что сорбции подвергается не только литий, но и остальные катионы в растворе. Присутствие щелочных металлов препятствует полному селективному выделению лития на органических смолах. Существует необходимость в разделении этих катионов после сорбции. Присутствие рубидия, цезия и стронция в составе проб воды позволяет рассматривать природный теплоноситель как перспективный источник для комплексного использования отработанного теплоносителя с целью получения не только лития, но и других ценных металлов. Указанные количества литофильных элементов близки к промышленным концентрациям для извлечения из гидроминерального сырья. Концентрации токсичных элементов в сбрасываемом геотермальном теплоносителе превышают предельно-допустимые концентрации для рыбохозяйственных вод. Раствор Паратунского месторождения термальных вод после сорбции содержит  $<0,1$  мг/дм<sup>3</sup> ионов лития (ПДК=0,08 мг/дм<sup>3</sup>), 27 мг/дм<sup>3</sup> ионов натрия (ПДК=120 мг/дм<sup>3</sup>),  $<1$  мг/дм<sup>3</sup> катионов калия (ПДК=50 мг/дм<sup>3</sup>) и кальция (ПДК=180 мг/дм<sup>3</sup>), что ниже уровней ПДК для рыбохозяйственных вод. Теплоноситель Паужетского месторождения парогидротерм после сорбции имеет химический состав, мг/дм<sup>3</sup>:  $C_{Li}=0,8$ ;  $C_K=11$ ;  $C_{Na}=287$  и  $C_{Ca}=10$ . Все эти элементы относятся к 4 классу опасности. Существует необходимость в удалении токсичных веществ припутном извлечении ценных компонентов. Оптимальной технологией для комплексного извлечения является сорбционная технология.

Для определения ионообменной стадии процесса использовали формулу на основании первого закона Фика в интегральном виде [26, 27]:

$$\ln(1-F) = -K\tau,$$

где  $F$  – степень обмена (доля превращения);  $K$  – константа скорости сорбции, с<sup>-1</sup>.

Степень обмена рассчитывали по формуле [26]:

$$F = COE / COE_{равн}.$$

Количество сорбируемого лития (COE) рассчитывали по формуле:

$$COE = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V_0}{m},$$

где  $C_0$  и  $C_t$  – исходная и равновесная концентрация вещества в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $V_0$  – исходный объем раствора, дм<sup>3</sup>;  $m$  – масса сорбента, г.

Экспериментальные исследования кинетики сорбции [21] позволили выявить лимитирующую стадию процесса. Линейная зависимость  $\ln(1-F)$  от времени сорбции подтверждает внешнEDIффузионный характер сорбции [26]. Графически определили константу скорости ( $K$ ) сорбционного процесса извлечения лития из модельных растворов. Для отечественного и зарубежного катионитов  $K=0,001$  с<sup>-1</sup>.

Участок резкого подъема в области малых равновесных концентраций лития в растворе характеризуется пропорциональной зависимостью количества сорбированного иона от его содержания в растворе. На этом участке лимитирующей стадией процесса является пленочная диффузия. Линейная зависимость  $\ln(1-F)$  от времени сорбции (рис. 3, 4) подтверждает внешнEDIффузионный характер сорбции из отработанного теплоносителя.

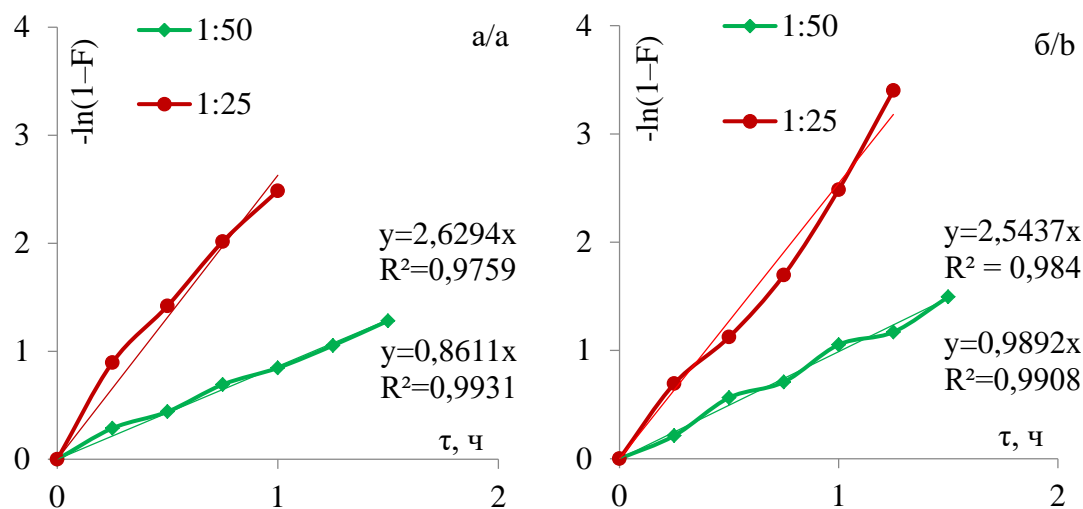
Значения константы обмена для растворов, вычисленные по рис. 6 для отечественного сорбента, составляют  $0,52 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> и при уменьшении Т:Ж в 2 раза –  $0,64 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Для зарубежного катионита происходит уменьшение с  $1,1 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> до  $0,50 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>.

В [28] эксперименты проводили с разным соотношением фаз. Сделан вывод о неполной реализации сорбционной способности промышленных сорбентов. Константа скорости сорбции лития из теплоносителя Паратунского месторождения термальных вод возрастает в ~3 раза при увеличении количества сорбента в 2 раза. Для растворов Паужетского месторождения константа скорости для отечественного катионита возросла в 1,2 раза, а для зарубежной смолы наоборот понизилась в 2,2 раза. Происходит уменьшение времени действия внешней диффузии сорбции при уменьшении соотношения твердой и жидкой фаз.

### Заключение

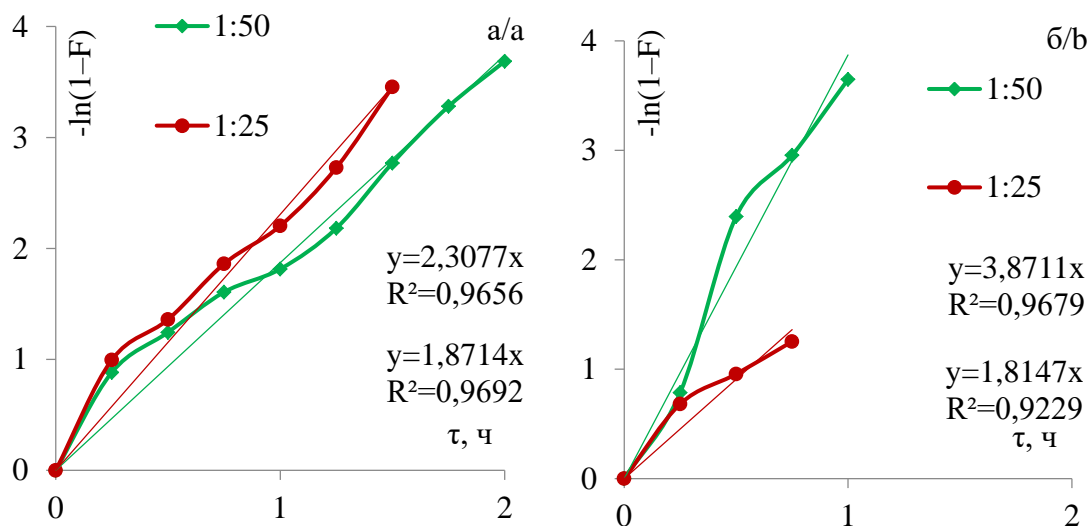
Сорбенты при таком Т:Ж не реализовали полностью свою сорбционную способность, следовательно, можно уменьшить количество твердой фазы в технологическом процессе извлечения лития. Динамические емкости сорбентов имеют незначительные различия, и результаты измерений согласуются. Из полученных данных наблюдаем конкурирующую сорбцию катионов, вытеснение одновалентных ионов двухвалентными. Процесс сорбции лимитируется внешнEDIффузионным механизмом, что подтверждается линейной зависимостью  $\ln(1-F)$ .

Значения константы обмена для растворов, вычисленные по рис. 3 для отечественного сорбента составляет  $0,24 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> и при уменьшении Т:Ж в 2 раза –  $0,73 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Для зарубежного катионита происходит увеличение с  $0,27 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> до  $0,71 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>.



**Рис. 3.** Зависимость  $-\ln(1-F)$  от времени сорбции лития из теплоносителя Паратунского месторождения термальных вод. Соотношение фаз 1:50 и 1:25. а) TOKEM-160; б) AMBERLITEIR-120

**Fig. 3.** Dependence  $-\ln(1-F)$  on the time of lithium sorption from the coolant of the Paratunskoe thermal water deposit. The phase ratio is 1:50 and 1:25. а) TOKEM-160; б) AMBERLITEIR-120



**Рис. 4.** Зависимость  $-\ln(1-F)$  от времени сорбции лития из теплоносителя Паужетского месторождения парогидротер. Соотношение фаз 1:50 и 1:25. а) TOKEM-160; б) AMBERLITEIR-120

**Fig. 4.** Dependence  $-\ln(1-F)$  on the time of lithium sorption from the coolant of the Pauzhetskoe steam hydrothermal deposit. The phase ratio is 1:50 and 1:25. а) TOKEM-160; б) AMBERLITEIR-120

Полученные растворы после регенерации необходимо подвергнуть концентрированию и извлечению ценных компонентов, таких как литий. Требуется дальнейшие исследования и оптимизация технологического процесса, в том числе процесса регенерации сорбентов с последующим получением целевого продукта (карбоната лития).

Геохимическая оценка состава гидроминеральных вод геотермальных месторождений показывает превышения ПДК для рыбохозяйственных рек Камчатского края. Увеличивается интерес к добыче редких и рассеянных элементов: литий, рубидий, цезий, стронций и др. Получение минеральных комплексов и ценных компонентов будет более эффективно при комплексном использовании геотермального источника.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Swain B. Recovery and recycling of lithium: a review // Separation and Purification Technology. – 2017. – V. 172. – P. 388–403.
- Siekierka A., Tomaszewska B., Bryjak M. Lithium capturing from geothermal water by hybrid capacitive deionization // Desalination. – 2018. – V. 436. – P. 8–14.
- Lithium market research – global supply, future demand and price development / G. Martin, L. Rentsch, M. Hock, M. Bertau // Energy Storage Materials. – 2017. – V. 6. – P. 171–179.
- Extraction of lithium from salt lake brine containing boron using multistage centrifuge extractors / D. Shi, L. Zhang, X. Peng, L. Li, F. Song, F. Nie, L. Ji, Y. Zhang // Desalination. – 2018. – V. 441. – P. 44–51.

5. The extraction ability and mechanism in extraction lithium by several organic extractants / H.-F. Li, L.-J. Li, L.-M. Ji, X.-W. Peng, W. Li // *Chemical Physics Letters*. – 2019. – V. 733. – P. 136–142.
6. Preliminary study on recovering lithium from high Mg<sup>2+</sup>/Li<sup>+</sup> ratio brines by electrodialysis / Z.-Y. Ji, Q.-B. Chen, J.-S. Yuan, J. Liu, Y.-Y. Zhao, W.-X. Feng // *Separation and Purification Technology*. – 2017. – V. 172. – P. 168–177.
7. The recovery of lithium from geothermal water in the Hatchobaru area of Kyushu, Japan / K. Yanagase, T. Yoshinaga, K. Kawano, T. Matsuoka // *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. – 1983. – V. 56. – P. 2490–2498.
8. Elimination of boron and lithium coexisting in geothermal water by adsorption-membrane filtration hybrid process / Y.K. Recepoglu, N. Kabay, I. Yilmaz-Ipek, M. Arda, M. Yuksel, K. Yoshizuka, S. Nishihama // *Separation Science and Technology*. – 2018. – V. 53:6. – P. 856–862.
9. Recovery of lithium from Uyuni salar brine / J.W. An, D.J. Kang, K.T. Tran, M.J. Kim, T. Lim, T. Tran // *Hydrometallurgy*. – 2012. – V. 117–118. – P. 64–70.
10. Zandevakili S., Ranjbar M., Ehteshamzadeh M. Recovery of lithium from Urmia Lake by a nanostructure MnO<sub>2</sub> ion sieve // *Hydrometallurgy*. – 2014. – V. 149. – P. 148–152.
11. Efficient lithium extraction by membrane capacitive deionization incorporated with monovalent selective cation exchange membrane / W. Shi, X. Liu, C. Ye, X. Cao, C. Gao, J. Shen // *Separation and Purification Technology*. – 2019. – V. 210. – P. 885–890.
12. Miyai Y., Ooi K., Katoh S. Recovery of lithium from seawater using a new type of ion-sieve adsorbent based on MgMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> // *Separation Science and Technology*. – 1988. – V. 23:1-3. – P. 179–191.
13. Ooi K., Miyai Y., Katoh S. Recovery of lithium from seawater by manganese oxide adsorbent // *Separation Science and Technology*. – 1986. – V. 21:8. – P. 755–766.
14. Nishihama S., Onishi K., Yoshizuka K. Selective recovery process of lithium from seawater using integrated ion exchange methods // *Solvent Extraction and Ion Exchange*. – 2011. – V. 29:3. – P. 421–431.
15. Structural characteristics and sorption properties of lithium-selective composite materials based on TiO<sub>2</sub> and MnO<sub>2</sub> / M.O. Chaban, L.M. Rozhdestvenska, O.V. Palchyk, Y.S. Dzyazko, O.G. Dzyazko // *Applied Nanoscience*. – 2019. – V. 9. – P. 1037–1045.
16. Study of lithium ion exchange by two synthetic zeolites: kinetics and equilibrium / R. Navarrete-Casas, A. Navarrete-Guijosa, C. Valenzuela-Calahorra, J.D. Lopez-Gonzalez, A. Garcia-Rodriguez // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – V. 306. – P. 345–353.
17. Адсорбция ионов лития на сульфогеле / З.М. Мустафаева, А.Ш. Рамазанов, Д.А. Свешникова, М.М. Гафуров, А.Ш. Асваров // *Вестник Дагестанского государственного университета*. – 2006. – № 1. – С. 53–59.
18. Investigations of the possibility of lithium acquisition from geothermal water using natural and synthetic zeolites applying poly (acrylic acid) / M. Wisniewska, G. Fijalkowska, I. Ostolska, W. Franus, A. Nosal-Wiercinska, B. Tomaszewska, J. Goscińska, G. Wojcik // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 195. – P. 821–830.
19. Горбач В.А. Утилизация отработанных теплоносителей при эксплуатации геотермальных месторождений Камчатки // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2016. – № 11 (специальный выпуск 31) «Камчатка-3». – С. 478–486.
20. Попов Г.В. Технологическая схема извлечения бора и лития из геотермальных теплоносителей // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 12 (специальный выпуск 35) «Камчатка-6». – С. 110–113.
21. Попов Г.В., Пашкевич Р.И. Кинетика ионного обмена лития из растворов в статических условиях // *Башкирский химический журнал*. – 2018. – Т. 25. – № 4. – С. 46–49.
22. Попов Г.В. Изучение сорбции ионов лития из геотермальных растворов ионообменными смолами // *Вестник ТвГУ, Серия Химия*. – 2019. – № 1 (35). – С. 199–206.
23. Lithium recovery from aqueous solution by sorption/desorption / J. Lemaire, L. Svecova, F. Lagallarde, R. Laucourmet, P.-X. Thivel // *Hydrometallurgy*. – 2014. – V. 143. – P. 1–11.
24. Lithium adsorption by acid and sodium amberlite / A. Navarrete-Guijosa, R. Navarrete-Casas, C. Valenzuela-Calahorra, J.D. Lopez-Gonzalez, A. Garcia-Rodriguez // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2003. – V. 264. – P. 60–66.
25. Won Y.S., You H.-N., Lee M.-G. Kinetics and equilibrium isotherm studies for the aqueous lithium recovery by various type ion exchange resins // *Korean Journal of Materials Research*. – 2016. – № 9. – V. 26. – P. 498–503.
26. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / Ч. Джайлс, Б. Инграм, Дж. Клуни, Я. Ликлема, Дж. Лэйн, Г. Парфит, Г. Рендалл, К. Рочестер, Г. Флир, Ф. Хесселинг, Д. Хой / Пер. с англ. / под ред. Г. Парфита, К. Рочестера. – М.: Мир, 1986. – 488 с.
27. Горшков В.И., Сафонов М.С., Воскресенский Н.М. Ионный обмен в противоточных колоннах. – М.: Наука, 1981. – 224 с.
28. Попов Г.В. Сорбция лития промышленными катионитами из теплоносителя Паратунского месторождения Камчатского края // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. – 2019. – № 1 (157). – С. 3–7.

Поступила 23.09.2020 г.

#### Информация об авторах

**Попов Г.В.**, младший научный сотрудник Научно-исследовательского геотехнологического центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

## LITHIUM EXCRETING ON SORBENTS TOKEM-160 AND AMBERLITE IR-120 FROM AQUEOUS SOLUTIONS

Grigory V. Popov,  
PopovG.V@yandex.ru

Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
30, p/56, North-Eastern Highway, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russia.

*At present, the Kamchatka geothermal deposits do not industrially extract lithium from natural solutions. The relevance of the research lies in the study of the sorption method for lithium extraction from the spent geothermal coolant. Lithium is one of the strategic metals for industry. Natural heat carrier contains rare and scattered elements, which can be obtained by sorption purification. The integrated use of geothermal resources is a promising direction in development of geothermal energy in the Kamchatka Territory. Obtaining valuable components will increase the productivity of the use of thermal energy of the Earth's bowels.*

**The aim** of the research is to establish the parameters of the sorption of industrial organic sorbents (TOKEM-160 and AMBERLITE IR-120) in relation to lithium ions under dynamic conditions.

**Method.** Investigations were carried out under static conditions from model and working solutions, with constant stirring. Sorption in the dynamic mode was carried out at room temperature using a model solution. The lithium ion content was determined by high performance liquid chromatography on a Shimadzu chromatograph.

**Results.** Sorption rate constants were determined. Based on experimental studies of lithium extraction from model solutions, the general laws of sorption, the protective action coefficients and the height of the working layer for industrial cation exchangers TOKEM-160 and AMBERLITE IR-120, as well as the dynamic adsorption capacity of the sorbents are established. The authors developed the recommendations on the use of cation exchange resins for the integrated processing of waste coolant. The paper introduces the microcomponent composition of samples of heat carriers of the Kamchatka Territory before and after sorption.

### Key words:

Sorption, lithium, industrial sorbents, extraction, geothermal coolant, Paratunsky deposit of thermal waters, Pauzhetsky geothermal deposit.

### REFERENCES

- Swain B. Recovery and recycling of lithium: a review. *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 172, pp. 388–403.
- Siekierka A., Tomaszewska B., Bryjak M. Lithium capturing from geothermal water by hybrid capacitive deionization. *Desalination*, 2018, vol. 436, pp. 8–14.
- Martin G., Rentsch L., Hock M., Bertau M. Lithium market research - global supply, future demand and price development. *Energy Storage Materials*, 2017, vol. 6, pp. 171–179.
- Shi D., Zhang L., Peng X., Li L., Song F., Nie F., Ji L., Zhang Y. Extraction of lithium from salt lake brine containing boron using multi-stage centrifuge extractors. *Desalination*, 2018, vol. 441, pp. 44–51.
- Li H.-F., Li L.-J., Ji L.-M., Peng X.-W., Li W. The extraction ability and mechanism in extraction lithium by several organic extractants. *Chemical Physics Letters*, 2019, vol. 733, pp. 136–142.
- Ji Z.-Y., Chen Q.-B., Yuan J.-S., Liu J., Zhao Y.-Y., Feng W.-X. Preliminary study on recovering lithium from high  $Mg^{2+}/Li^{+}$  ratio brines by electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 172, pp. 168–177.
- Yanagase K., Yoshinaga T., Kawano K., Matsuoka T. The recovery of lithium from geothermal water in the Hatchobaru area of Kyushu, Japan. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1983, vol. 56, pp. 2490–2498.
- Recepoglu Y.K., Kabay N., Yilmaz-Ipek I., Arda M., Yuksel M., Yoshizuka K., Nishihama S. Elimination of boron and lithium co-existing in geothermal water by adsorption-membrane filtration hybrid process. *Separation Science and Technology*, 2018, vol. 53:6, pp. 856–862.
- An J.W., Kang D.J., Tran K.T., Kim M.J., Lim T., Tran T. Recovery of lithium from Uyuni salar brine. *Hydrometallurgy*, 2012, vol. 117–118, pp. 64–70.
- Zandevakili S., Ranjbar M., Ehteshamzadehc M. Recovery of lithium from Urmia Lake by a nanostructure  $MnO_2$  ion sieve. *Hydrometallurgy*, 2014, vol. 149, pp. 148–152.
- Shi W., Liu X., Ye C., Cao X., Gao C., Shen J. Efficient lithium extraction by membrane capacitive deionization incorporated with monovalent selective cation exchange membrane. *Separation and Purification Technology*, 2019, vol. 210, pp. 885–890.
- Miyai Y., Ooi K., Katoh S. Recovery of lithium from seawater using a new type of ion-sieve adsorbent based on  $MgMn_2O_4$ . *Separation Science and Technology*, 1988, vol. 23:13, pp. 179–191.
- Ooi K., Miyai Y., Katoh S. Recovery of lithium from seawater by manganese oxide adsorbent. *Separation Science and Technology*, 1986, vol. 21:8, pp. 755–766.
- Nishihama S., Onishi K., Yoshizuka K. Selective recovery process of lithium from seawater using integrated ion exchange methods. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2011, vol. 29:3, pp. 421–431.
- Chaban M.O., Rozhdestvenska L.M., Palchyk O.V., Dzyazko Y.S., Dzyazko O.G. Structural characteristics and sorption properties of lithium-selective composite materials based on  $TiO_2$  and  $MnO_2$ . *Applied Nanoscience*, 2019, vol. 9, pp. 1037–1045.
- Navarrete-Casas R., Navarrete-Guijosa A., Valenzuela-Calahorra C., Lopez-Gonzalez J.D., Garcia-Rodriguez A. Study of lithium ion exchange by two synthetic zeolites: kinetics and equilibrium. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 306, pp. 345–353.
- Mustafaeva Z.M., Ramazanov A.Sh., Sveshnikova D.A., Gafurov M.M., Asvarov A.Sh. Adsorption of lithium ions on sulfonate. *Bulletin of the Dagestan State University*, 2006, no. 1, pp. 53–59. In Rus.
- Wisniewska M., Fijalkowska G., Ostolska I., Franus W., Nosal-Wiercinska A., Tomaszewska B., Goscianska J., Wojcik G. Investigations of the possibility of lithium acquisition from geothermal water using natural and synthetic zeolites applying poly (acrylic acid). *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 195, pp. 821–830.
- Gorbach V.A. Utilization of waste heat carriers during exploitation of geothermal deposits of Kamchatka. *Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2016, no. 11 (special issue 31) «Kamchatka-3», pp. 478–486. In Rus.
- Popov G.V. Technological scheme for the extraction of boron and lithium from geothermal fluids. *Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, no. 12 (special issue 35) «Kamchatka-6», pp. 110–113. In Rus.
- Popov G.V., Pashkevich R.I. Kinetics of ion exchange of lithium from solutions under static conditions. *Bashkir Chemical Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 46–49. In Rus.
- Popov G.V. Studying the sorption of lithium ions from geothermal solutions by ion-exchange resins. *Vestnik TvGU, Series Chemistry*, 2019, no. 1 (35), pp. 199–206. In Rus.

23. Lemaire J., Svecova L., Lagallarde F., Laucournet R., Thivel P.-X. Lithium recovery from aqueous solution by sorption/desorption. *Hydrometallurgy*, 2014, vol. 143, pp. 1–11.
24. Navarrete-Guijosa A., Navarrete-Casas R., Valenzuela-Calahorra C., Lopez-Gonzalez J.D., Garcia-Rodriguez A. Lithium adsorption by acid and sodium amberlite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, vol. 264, pp. 60–66.
25. Won Y.S., You H.-N., Lee M.-G. Kinetics and equilibrium isotherm studies for the aqueous lithium recovery by various type ion exchange resins. *Korean Journal of Materials Research*, 2016, no. 9, vol. 26, pp. 498–503.
26. Giles Ch., Ingram B., Cluny J., Liklema J., Lane J., Parfit G., Rendall G., Rochester K., Flir G., Hesseling F., Howe D. *Adsorbtion iz rastvorov na poverkhnostyakh tverdykh tel* [Adsorption from solutions on solid surfaces]. Translated from English. Eds. G. Parfita, C. Rochester. Moscow, Mir Publ., 1986. 488 p.
27. Gorshkov V.I., Safonov M.S., Voskresensky N.M. *Ionny obmen v protivotochnykh kolonnakh* [Ion exchange in countercurrent columns]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 224 p.
28. Popov G.V. Lithium sorption by industrial kations from heat transfer liquid of Paratunskoe deposit Kamchatka region. *Ispolzovanie i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii*, 2019, no. 1 (157), pp. 3–7. In Rus.

Received: 23 September 2020.

#### Information about the authors

**Grigory V. Popov**, junior research, Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.



УДК 504.064.2.001.18, 550.394.4

## МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ ПРОЯВЛЕНИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ФАКТОРА СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ КИРГИЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Романенко Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
svr@tpu.ru

Ларионова Екатерина Владимировна<sup>1</sup>

Малдыбаев Урмат Амантурович<sup>2</sup>,  
urmat\_japarov@mail.ru

Айдаралиев Болотбек Рысбекович<sup>2</sup>,  
ktrmc@krsu.edu.kg

Ордобаев Бейшенбек Сыдыкбекович<sup>2</sup>,  
ordobaev@mail.ru

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

<sup>2</sup> Киргизско-Российский Славянский университет,  
Киргизская Республика, 720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью управления риском активизации оползневых процессов на территории Киргизской Республики, которые наносят ощутимый экономический, экологический и социальный ущерб и приводят к большим человеческим жертвам. Это имеет большое значение для рационального природопользования, обеспечения безопасности населения, объектов экономики и инфраструктуры. Одним из важнейших факторов формирования оползневых процессов является сейсмическая активность.

**Цель:** разработать методику управления риском активизации оползневых процессов на основе взаимосвязи между оползневыми процессами и сейсмической активностью на территории Киргизской Республики.

**Методы:** данные Международного сейсмологического центра и Главного управления Министерства чрезвычайных ситуаций Киргизской Республики, регрессионный анализ.

**Результаты.** Предложена методика управления риском на примере риска активизации оползневых процессов в природных условиях Киргизской Республики с учетом фактора сейсмичности. Методика предполагает оценку риска оползневых процессов, оценку эффективности затрат для каждого мероприятия по снижению риска и оценку срока окупаемости каждого мероприятия. Исходя из срока окупаемости проводится ранжирование мероприятий и определяется эффективность каждого мероприятия по снижению риска. Для оценки риска активизации оползневых процессов использовали вероятностно-статистический анализ. В работе найдена корреляция зависимости между оползневыми процессами и сейсмической активностью (сумма магнитуд землетрясений), проведен регрессионный анализ. Показано, что наблюдается удовлетворительная линейная корреляция между количеством оползневых процессов и суммой магнитуд землетрясений в период с 1969 по 2010 гг. в Ошской, Жалал-Абадской и Баткенской областях Киргизской Республики. Проведена оценка риска оползневых процессов для села Аскалы Алайского района Ошской области Киргизской Республики. Предложен ряд мероприятий для уменьшения риска оползневых процессов, оценена эффективность и окупаемость данных мероприятий. Показано, что лесомелиоративную защиту можно считать эффективной с точки зрения издержек.

### Ключевые слова:

Управление риском, прогнозирование, оползневые процессы, сейсмическая активность, регрессионный анализ, экономическая эффективность.

### Введение

На территории Киргизской Республики в течение последних десяти лет отмечается существенное возрастание оползневой активности в связи с активизацией взаимодействующих современных геодинамических движений, сейсмичности, подъемом уровня подземных вод, аномальным количеством выпадающих атмосферных осадков, а также инженерно-хозяйственной деятельностью человека, нарушающей баланс устойчивости склона в горных зонах. Оползни на территории Киргизстана осложняют природопользование, приводят к разрушениям жилых домов и инфраструктуры населенных пунктов вследствие их расположения вблизи опасных склонов, представляют угрозу перекрытия русел рек,

что сопровождается формированием прорывоопасных плотин запрудных озер, которые, в случае прорыва, несут селе-паводковые бедствия расположенным ниже по руслу реки домам, дорогам, мостам, ЛЭП, хвостохранилищам и другим объектам [1–4].

Для предотвращения ощутимого экономического, экологического, социального ущерба от активизации оползневых процессов необходимо внедрение администрациями регионов совместно с ведомственными и научными организациями процесса управления рисками. Управление риском складывается из следующих этапов, которые чередуются циклически: (пере)оценка риска (прогнозирование), выбор эффективных и экономических средств нейтрализации рисков.

Известно достаточно большое число подходов к прогнозированию оползневой опасности, среди которых выделяют локальные и региональные методы, которые делятся на качественный и количественный прогноз. В свою очередь количественные методы прогноза в зависимости от методологии подхода разделяются на детерминированные и вероятностные [4]. В работах [5–7] приведены обзоры методов, применяемых для оценки риска оползневых процессов. В работе [8] показано, что в последние десять лет значительно увеличилось количество публикаций в области прогнозирования оползневых процессов, что связано с развитием и доступностью методов дистанционного зондирования, математического моделирования и технологий ГИС, а также с пониманием администрациями регионов необходимости проведения научных исследований для выявления районов, подверженных повышенному риску оползневых процессов, что поможет более эффективному планированию мероприятий по снижению этих рисков.

Проявление оползневых процессов обусловлено взаимодействием разнообразных факторов, таких как геологическое строение, геоморфологические условия, современные тектонические движения, климатические и гидрогеологические условия, сейсмические процессы и др. Группу факторов, определяющих режимы проявления оползней в краткосрочных глобальных и локальных прогнозах, называют триггерными [6]. Эта группа факторов включает атмосферные осадки и режим их выпадения, температурные условия, изменение уровня подземных вод, притока поверхностных вод, изменение влажности грунта, прочностные и деформационные свойства горных пород, сейсмические проявления (землетрясения), антропогенное воздействие и другие [4].

Несмотря на большое количество используемых подходов, проблему прогнозирования оползневой опасности нельзя считать решенной. Оценка риска оползневых процессов остается сложной проблемой из-за того, что морфологические свойства грунтов и характеристики склона сильно различаются даже на небольших расстояниях, а время, место и интенсивность запуска триггерных факторов трудно прогнозировать [7].

Одним из важнейших факторов формирования оползневых процессов на территории Киргизской Республики является сейсмическая активность [3]. Землетрясения оказывают значительное влияние на устойчивость склонов. При прохождении сейсмической волны возникают инерционные силы, способные увеличивать сдвиговые усилия и тем самым создавать более благоприятные условия для формирования оползней [4].

Цель исследования – разработать методику управления риском активизации оползневых процессов на основе изучения взаимосвязи между оползневыми процессами и сейсмической активностью на территории Киргизской Республики.

#### Методы

Для прогнозирования влияния триггерных факторов используют вероятностно-статистические методы.

Среди них достаточно эффективным является нахождение корреляционных и регрессионных зависимостей устойчивости оползневых процессов от различных факторов [4, 7]. В работах Д. Киффера [9, 10] установлена линейная корреляционная связь между общим числом зарегистрированных оползней и сейсмической активностью на территории 650 км<sup>2</sup>, полученная по данным аэрофотосъемки и полевых исследований. В работах [11, 12] приводятся подтверждение и уточнение корреляций, полученных в работах Д. Киффера. Логистическая регрессия использовалась при оценке вероятности оползневых процессов при влиянии факторов колебания грунта, топографического фактора, литологии, влажности грунта, количества осадков, растительного покрова, магнитуды землетрясений [13–15]. При детальной характеристике отдельных оползней используются регрессионные зависимости физических характеристик оползня от изменяющихся факторов (амплитуда землетрясения, количество осадков) [16]. В региональном ретроспективном мониторинге находит применение корреляционный анализ зависимостей физических характеристик оползней и величины триггерных факторов от характеристик отдельных землетрясений [17–21].

При проведении вероятностно-статистического анализа требуется большой объем достоверных результатов натурных наблюдений. В Киргизской Республике в последние годы Министерство по чрезвычайным ситуациям (МЧС) совместно с научно-исследовательскими организациями активно развивает систему сбора статистических данных об опасных явлениях и процессах, которая имеет не только практическое, но и научно-прогностическое значение [1]. Полученные данные могут быть использованы для развития вероятностно-статистических методов оценки краткосрочных рисков оползневых процессов в рамках экономико-географических регионов Киргизской Республики для получения общего представления о подверженности территории страны оползневым процессам.

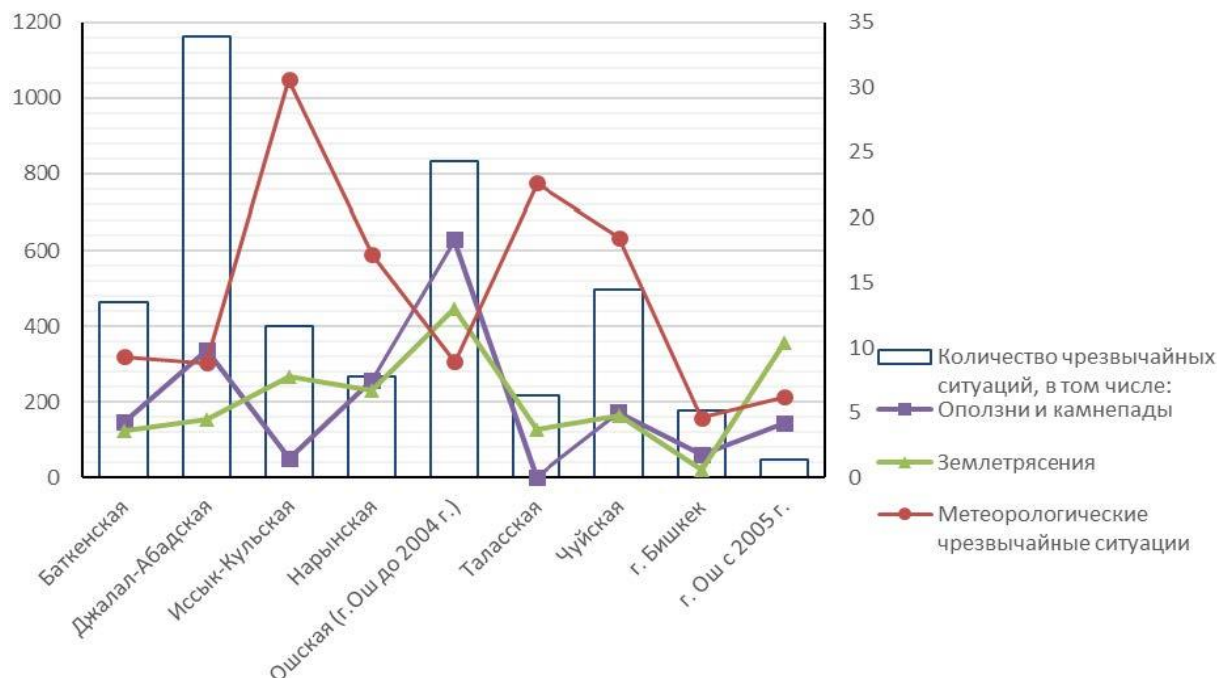
В работе были использованы данные «Международного сейсмологического центра» [22] по магнитуде землетрясений, произошедших в исследуемых районах Киргизской Республики и данные МЧС Киргизской Республики по количеству оползневых процессов в различных районах Киргизии с 1969 по 2010 гг. Эффективность противооползневых мероприятий оценивали экспертным путем [23]. Для обработки полученных зависимостей количества оползневых процессов от магнитуды землетрясений использовали регрессионный анализ с помощью программы Statistica 8.0 [24].

#### Результаты и их обсуждение

Наибольшее распространение оползневые процессы получили на юге Киргизской Республики. Развитие и квазипериодическая активизация оползневых процессов на юге страны связаны с особенностями и сочетанием оползнеобразующих геологических и климатических факторов: наличием слабоустойчивых горных склонов, имеющих геофильтрационное строение и рыхлый поверхностный чехол (лёсс, лёссовид-

ные суглинки) мощностью в десятки метров; повышенной сеймотектонической активностью региона; сезонным переувлажнением грунтов, слагающих склоны за счет интенсивных и обильных атмосферных осадков, снеготаяния и периодического повышения уровней грунтовых и подземных вод [4].

Как видно из рис. 1, в Ошской области доля оползневых процессов достигает 51,5 % от общего числа чрезвычайных ситуаций, в Жалал-Абадской области – 29 %, в Баткенской области – 16,6 %, что свидетельствует о значимости оползневых процессов в данных областях.



**Рис. 1.** Количество зарегистрированных чрезвычайных ситуаций, связанных с основными видами опасных природных и техногенных процессов за 2000–2016 гг. на территории административных областей Киргизской Республики

**Fig. 1.** Number of emergencies related to natural and man-made processes for 2000–2016 in the territory of the administrative authority of the Kyrgyz Republic

В работе рассмотрена корреляция между количеством оползневых процессов и сейсмической активностью в период с 1969 по 2010 гг. в Алайском, Сузакском и Лейлекском районах, расположенных соответственно в Ошской, Жалал-Абадской и Баткенской областях. В качестве показателя сейсмической активности использовали сумму магнитуд землетрясений выше 4, имеющих эпицентры в исследуемых районах, в течение года, учитывая, что землетрясения с магнитудой ниже 4 практически не приводят к активизации оползневых процессов, а на расстоянии более 10 км<sup>2</sup> от эпицентра землетрясения плотность оползней составляет менее одного на км<sup>2</sup> [17, 19].

На рис. 2 приведены зависимости количества оползней от суммы магнитуд землетрясений в трех районах Ошской, Жалал-Абадской и Баткенской областей. В табл. 1 приведены результаты линейного регрессионного анализа зависимостей, представленных на рис. 2. Как показано в табл. 1, нулевые гипотезы о линейности не отклоняются и принимаются альтернативные гипотезы о значимости угла наклона линейной модели. Таким образом, наблюдается статистически значимая корреляция между количеством оползней и сейсмической активностью. Отметим, что для исследуемой корреляции в случае Жалал-Абадской области свободный коэффициент линейной

модели значительно отличается от нуля, поскольку нулевая гипотеза о значимости свободного коэффициента не отклонена, что необходимо учитывать при оценке количества оползневых процессов.

Используя данные о районировании Киргизской Республики по сейсмической опасности и полученные выше зависимости, можно оценить риск оползневых процессов на исследуемых территориях.

Следующим этапом процесса управления рисками является введение мероприятий по снижению риска и оценка их экономической эффективности. Для определения экономической эффективности мероприятий по снижению риска используют различные подходы и критерии в зависимости от отрасли управления рисками: охрана труда [25], экологическая безопасность [26], производственная безопасность [27].

В данной работе нами предложена общая методология оценки экономической эффективности мероприятий по снижению риска. В случае если вероятность возникновения неблагоприятного события может быть определена (для отдельного неблагоприятного события, однотипных событий, группы событий и т. д.), величину риска  $R_i$  (индивидуального, группового или суммарного) можно оценить как произведение вероятности данного события ( $P_i$ ) на величину принесенного (прямого или косвенного) ущерба  $Y_i$ :

$$R_i = P_i Y_i.$$

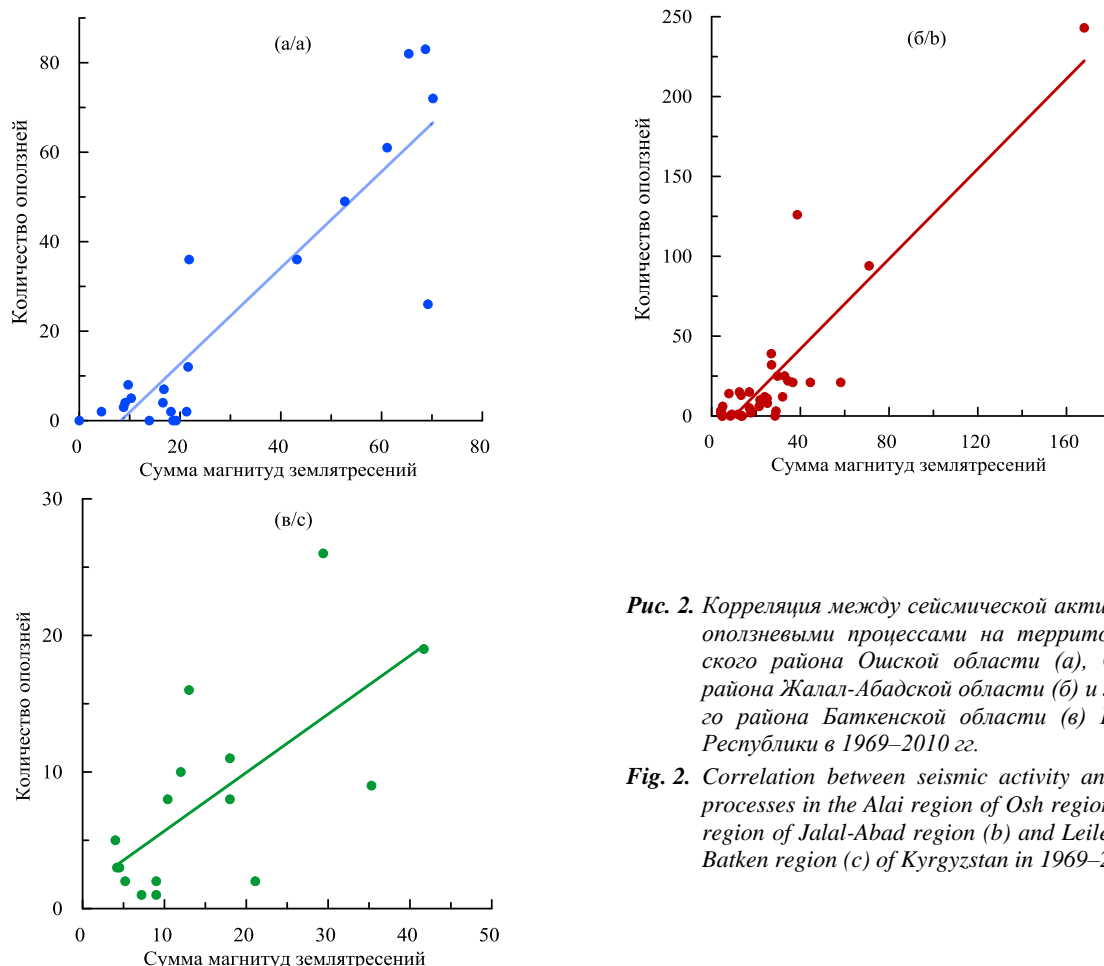
Размерность риска в этом случае будет [деньги]/[ед. времени], например [р./г], а экономический смысл величины риска заключается в скорости возникновения убытков.

Вероятность оползневых процессов можно оценить, используя полученные нами регрессионные зависимости количества оползневых процессов от годовой суммы магнитуд землетрясения. Таким обра-

зом, групповой риск проявления оползневых процессов на некоторой территории можно определить как величину:

$$R = bMY, \quad (1)$$

где  $b$  – угол наклона регрессионной зависимости между сейсмической активностью и интенсивностью оползневых процессов;  $M$  – сумма магнитуд землетрясений в этом районе в течение года.



**Рис. 2.** Корреляция между сейсмической активностью и оползневыми процессами на территории Алайского района Ошской области (а), Сузакского района Жалал-Абадской области (б) и Лейлекского района Баткенской области (в) Киргизской Республики в 1969–2010 гг.

**Fig. 2.** Correlation between seismic activity and landslide processes in the Alai region of Osh region (a), Suzak region of Jalal-Abad region (b) and Leilek region of Batken region (c) of Kyrgyzstan in 1969–2010

**Таблица 1.** Результаты регрессионного анализ данных, представленных на рис. 2

**Table 1.** Results of regression analysis of the data presented in Fig. 2

Коэффициенты модели Regression coefficients	Оценка коэффициентов модели Estimation of regression coefficients	Стандартная ошибка Standard error	Значение $p$ для гипотезы о значимости коэффициентов модели $p$ value for hypothesis of significance of regression coefficients
Алайский район Ошской области/Alai region of Osh region			
$r=0,89220512$ ; гипотеза о линейности/hypothesis test for linearity: $p<0,00000$ ; стандартная ошибка/standard error: 13,332			
Свободный член/Intercept	–9	5	0,06514
Наклон/ Line slope	1,1	0,1	$2,43 \times 10^{-8}$
Сузакский район Жалал-Абадской области/Suzak region of Jalal-Abad region			
$r=0,89106831$ ; гипотеза о линейности/hypothesis test for linearity: $p<0,00000$ ; стандартная ошибка/standard error: 20,496			
Свободный член/Intercept	–14	5	0,002941
Наклон/ Line slope	1,4	0,1	$6,57 \times 10^{-14}$
Лейлекский район Баткенской области/Leilek region of Batken region			
$r=0,68127455$ ; гипотеза о линейности /hypothesis test for linearity: $p<0,00366$ ; стандартная ошибка/standard error: 5,4911			
Свободный член/Intercept	1	2	0,552727
Наклон/ Line slope	0,4	0,1	0,003662

$r$  – коэффициент корреляции/correlation coefficient,  $p$  – достигнутый уровень значимости/achieved significance level, фиксированный уровень значимости равен 0,05/fixed significance level is equal to 0,05.

По данным МЧС Киргизской Республики оползневые процессы охватывают около 20 % территории Алайского района Ошской области [2]. На примере с. Аскалы Алайского района покажем методологию оценки риска оползневых процессов и эффективности противооползневых мероприятий. В соответствии с картой районирования по сейсмической опасности [1] с. Аскалы Алайского района находится в Гульчинской зоне ожидаемых землетрясений – третьей категории опасности с классом ожидаемых землетрясений 12–15, интенсивностью 6–7 баллов.

Определим размер ущерба как сумму выплат и компенсации при возникновении оползневых процессов для жителей с. Аскалы. Примем, что на территории села расположены 12 жилых домов в среднем по 3 жителя в каждом доме, итого 36 человек; категория выплат: III категория, 1001 расчётных показателей Киргизской Республики [28]. Один расчетный показатель равен 100 сомов=103 руб. [29, 30]. Таким образом, размер ущерба составляет:

$$Y=36 \times 1001 \times 103=3711708 \text{ р.}$$

Примем, что сейсмичность составляет 7 баллов повторяемостью 3 раза в год, итого 21 балл [1]. Оценка риска оползневых процессов по формуле (1) будет составлять:

$$R=1,1 \times 21 \times 3711708=85740455 \text{ р./год.}$$

Для снижения риска оползневых процессов в выбранном селе введем ряд противооползневых мероприятий [23]:

1. Противооползневые дренажи.
2. Изменение баланса грунтовых масс на оползневом склоне. Контрбанкеты.
3. Лесомелиорация.

Дренажирование подземных вод применяется в целях устранения воздействия на породы, образующие оползневый склон, снижения или полного снятия гидростатического и гидродинамического напоров, уменьшения дебита подземных вод еще до их подхода к оползневому склону, удаления подземных вод, выклинивающихся на поверхность. Изменение баланса грунтовых масс и контрбанкеты применяются с

целью улучшения распределения напряжений, испытываемых породами оползневого склона, и образования искусственного рельефа, отвечающего требованиям повышения общей и частной устойчивости склона и планировки оползневого района, перемещением больших и малых масс грунта. Лесомелиорация применяется для закрепления поверхностей оползневых склонов древесно-кустарниковой растительностью, посевом трав и одерновкой [23].

Размер эффективных затрат ( $E_{Z,j}$ ) (конкретного мероприятия) определяется как:

$$E_{Z,j} = Z_j / K_{R,j}, \quad (2)$$

где  $Z_j$  – затраты для конкретного мероприятия;  $K_{R,j}$  – коэффициент эффективности для конкретного мероприятия (оценивается экспертным путем).

Трудность восприятия «эффективных затрат» заключается в том, что, имея размерность [деньги], они могут быть равны (при максимальной эффективности мероприятия, т. е. полного исключения риска) или больше (при не полном исключении риска, а снижении вероятности его проявления и/или уменьшения ущерба) фактических (необходимых) затрат на рассматриваемое мероприятие. В этом смысле увеличение «эффективных затрат» по сравнению с фактическими будет корректировать (удлинять) срок окупаемости при неполной эффективности мероприятий.

Оценим окупаемость мероприятий. Срок окупаемости мероприятий  $T_j$  по снижению риска  $R$  определяется как:

$$T_j = E_{Z,j} / R [\text{ед. времени}], \quad (3)$$

где  $E_{Z,j}$  – размер эффективных затрат (2). Под окупаемость конкретного мероприятия мы понимаем тот период времени, через который ожидаемые издержки (связанные с риском) превысят затраты на предлагаемое мероприятие.

В табл. 2 приведена оценка сроков окупаемости предложенных противооползневых мероприятий рассчитанных по (3).

**Таблица 2.** Оценка затрат и окупаемости противооползневых мероприятий

**Table 2.** Evaluation of the costs and payback of landslide prevention works

Мероприятия по снижению риска Activities for risk reduction	Затраты на мероприятия [23], $Z_j$ р. Costs of activities [23], $Z_j$ , rubles	Коэффициент эффективности затрат, $K_{R,j}$ Coefficient of effectiveness of cost, $K_{R,j}$	Эффективные затраты, $E_{Z,j}$ р. Effective expenses, $E_{Z,j}$ , rubles	Срок окупаемости, $T_j$ , лет Payback time, $T_j$ , years	Ранжирование по окупаемости Payback ranking
Противооползневые дренажи Landslide control drainage	4060799	0,4	10151998	0,118	III
Контрбанкет/Counterberm	381523	0,6	635872	0,007	II
Лесомелиорация Forest reclamation	182668	0,7	260955	0,003	I

Таким образом, наиболее эффективным по окупаемости мероприятием можно считать лесомелиоративную защиту. При этом после внедрения мероприятия может быть сделан перерасчет риска с тем, чтобы можно было оценить эффективность очередного мероприятия по его снижению.

## Заключение

В работе предложена методика управления риском на примере риска активизации оползневых процессов в природных условиях Киргизской Республики с учетом фактора сейсмичности. Методика предполагает оценку риска оползневых процессов с учетом влия-

ния амплитуды землетрясений, оценку эффективности затрат для каждого мероприятия по снижению риска и оценку срока окупаемости каждого мероприятия. Исходя из срока окупаемости проводится ранжирование мероприятий и определяется эффективность каждого мероприятия по снижению риска. Процесс управления риском может быть проведен циклично до снижения риска до приемлемого уровня.

Для оценки риска оползневых процессов в данной работе предложено использовать корреляцию зависимости между количеством оползневых процессов и сейсмической активностью. Для увеличения прогностической достоверности предложенной корреляционной зависимости оценки рисков оползневых процессов необходимо учитывать влияние других триг-

герных факторов, таких как, например, количество осадков, температурные условия, изменение уровня подземных вод, антропогенное воздействие и др.

Управление риском оползневых процессов на уровне администраций регионов позволит установить приемлемый режим природопользования, разработать и внедрить программы устойчивого развития регионов Кыргызской Республики, проводить природоохранные мероприятия и инженерную защиту объектов социально-экономической инфраструктуры и природно-территориальных систем Кыргызской Республики.

Предложенная методика может быть использована для управления риском возникновения опасностей в различных сферах деятельности человека.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. – Бишкек: Изд-во МЧС КР, 2017. – 743 с.
2. Ибатуллин Х.В. Мониторинг оползней Кыргызстана. – Бишкек: Изд-во МЧС КР, 2011. – 145с.
3. Предупреждение рисков от оползней в Центральной Азии / Б.Д. Молдобеков, Ш.Э. Усупаев, У.А. Абдыбабаев, Х.В. Ибатуллин, А.К. Сарногоев, М. Абдрахманов, А.В. Мелешко // Известия КГТУ им. Н.Раззакова. – 2014. – Т. 33. – С. 435–439.
4. Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности: дис. ... д-ра наук. – М., 2014. – 309 с.
5. A review of engineering landslide prevention and control / S. Wu, T. Wang, J. Shi, L. Shi, P. Xin // Geological Bulletin of China. – 2013. – V. 32. – № 12. – P. 1871–1880.
6. A review of statistically-based landslide susceptibility models / P. Reichenbach, M. Rossi, B.D. Malamud, M. Mihir, F. Guzzetti // Earth-Science Reviews. – 2018. – V. 180. – P. 60–91.
7. Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards // Science. – 2007. – V. 316. – P. 1136–1138.
8. Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016) / H.R. Pourghasemi, Z. Teimoori Yansari, P. Panagos, B. Pradhan // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – V. 11. – № 9. – P. 1–12.
9. Keefer D.K. Investigating landslides caused by earthquakes – a historical review // Surveys in Geophysics. – 2002. – V. 23. – P. 473–510.
10. Keefer D.K. Landslides generated by earthquakes: immediate and long-term effects // Treatise on Geomorphology: Tectonic Geomorphology. – San Diego: Academic Press, 2013. – V. 5. – P. 250–266.
11. Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach. P. Landslides, earthquakes and erosion // Earth Planet. Sci. Letters. – 2004. – V. 229. – P. 45–59.
12. Rodriguez C.E., Bommer J.J., Chandler R.J. Earthquake-induced landslides: 1980–1997 // Soil Dyn Earthq Eng. – 1999. – V. 18. – № 5. – P. 325–346.
13. A global empirical model for near-real-time assessment of seismically induced landslides / M.A. Nowicki Jessee, M.W. Hamburger, K. Allstadt, D.J. Wald, S.M. Robeson, H. Tanyas, E.M. Thompson // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2018. – V. 123. – № 8. – P. 1835–1859.
14. Development of a globally applicable model for near real-time prediction of seismically induced landslides / M.A. Nowicki, D.J. Wald, M.W. Hamburger, M. Hearne, E.M. Thompson // Engineering Geology. – 2014. – V. 173. – P. 54–65.
15. A global slope unit-based method for the near real-time prediction of earthquake-induced landslides / H. Tanyas, M. Rossi, M. Alvioli, C.J. van Westen, I. Marchesini // Geomorphology. – 2019. – V. 327. – P. 126–146.
16. Торгоев И.А. Система мониторинга оползней в Кыргызстане // Технологии гражданской безопасности. – 2013. – Т. 10. – № 4 (38). – С. 68–71.
17. Keefer D.K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution – the 1989 Loma Prieta, California event // Engineering Geology. – 2000. – V. 58. – № 3–4. – P. 231–249.
18. Chen Xiaoli, Liu Chunguo. Complex seismic focus structure and earthquake-triggered landslide distribution: analysis of the 2014 Ludian Mw6.1 Earthquake in Yunnan // Acta Geologica Sinica. – 2017. – V. 91. – № 2. – P. 733–734.
19. Geometrical characteristics of earthquake-induced landslides and correlations with control factors: A case study of the 2013 Minxian, Gansu, China, Mw 5.9 event / Y. Tian, C. Xu, J. Chen, Q. Zhou, L. Shen // Landslides. – 2017. – V. 14. – № 6. – P. 1915–1927.
20. Xu C., Xu X. Statistical analysis of landslides caused by the Mw 6.9 Yushu, China, earthquake of April 14, 2010 // Natural Hazards. – 2014. – V. 72. – № 2. – P. 871–893.
21. The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 Mw7.8 Gorkha earthquake / K. Roback, M.K. Clark, A.J. West, D. Zekkos, G. Li, S.F. Gallen, D. Chamlagain, J.W. Godt // Nepal Geomorphology. – 2018. – V. 301. – P. 121–138.
22. Международный сейсмологический центр. URL: <http://www.isc.ac.uk/> (дата обращения 25.02.2019).
23. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней. Основные положения, нормы и правила / Б.Р. Айдаралиев, Б.С. Ордобаев, Р.С. Супаналиев, Н.Дж. Садабаева, М. Атамбек уулу. – Бишкек: КРСУ, 2014. – 199 с.
24. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
25. Сердюк В.С., Бакико Е.В. Экономика безопасности труда. – Омск: ОмГТУ, 2011. – 160 с.
26. РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах. – М.: ЭС НТИ «Техэксперт», 2004. – 37 с.
27. Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду: Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 г. № 255. URL: <http://government.ru/docs/26694/> (дата обращения 10.04.2020).
28. Об утверждении Классификации чрезвычайных ситуаций и критериев их оценки в Кыргызской Республике: Постановление Правительства Кыргызской Республики от 22 ноября 2018 года № 550. URL: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/12747> (дата обращения 10.04.2020).
29. О расчетном показателе: Закон Кыргызской Республики от 27 января 2006 года № 13: Принят Жогорку Кенешем Кыргызской Республики 8 декабря 2005 г. URL: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/1801> (дата обращения 10.04.2020).
30. Об утверждении размера расчетного показателя: Постановление Жогорку Кенеша Кыргызской Республики от 15 июня 2006 года № 1115-III. URL: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/51948> (дата обращения 10.04.2020).

Поступила 15.04.2020 г.



#### **Информация об авторах**

**Романенко С.В.**, доктор химических наук, профессор Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ларионова Е.В.**, кандидат химических наук, доцент Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Малдыбаев У.А.**, аспирант Киргизско-Российского Славянского университета.

**Айдаралиев Б.Р.**, директор учебного научно-технического центра «Развитие гражданской защиты» Киргизско-Российского Славянского университета.

**Ордобаев Б.С.**, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой защиты в чрезвычайных ситуациях Киргизско-Российского Славянского университета.

## RISK MANAGEMENT TECHNIQUE OF LANDSLIDES ACTIVATION WITH ACCOUNT OF SEISMIC ACTIVITY FACTOR IN KYRGYZSTAN

Sergey V. Romanenko<sup>1</sup>,  
svr@tpu.ru

Ekaterina V. Larionova<sup>1</sup>

Urmat A. Muldybaev<sup>2</sup>,  
urmat\_japarov@mail.ru

Bolotbek R. Aydaraliev<sup>2</sup>,  
ktrmc@krsu.edu.kg

Beishenbek S. Ordobaev<sup>2</sup>,  
ordobaev@mail.ru

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

<sup>2</sup> Kyrgyz-Russian Slavic University,  
44, Kievskaya avenue, Bishkek, 720000, Kyrgyzstan.

**The relevance** of the research is caused by the need to manage the risk of landslide processes in Kyrgyzstan, which cause significant economic, environmental and social damage and lead to great loss of life. This is of great importance for sustainable use of natural resources, ensuring the safety of the population, economic and infrastructure facilities. One of the most important factors in the formation of landslide processes is seismic activity.

**The main aim** of the research is to develop a risk management methodology for the activation of landslide processes based on the relationship between landslide processes and seismic activity in the Kyrgyzstan.

**Methods:** data of International Seismological Center and Main Directorate of Ministry of Emergencies of Kyrgyzstan, regression analysis.

**Results.** A risk management technique is proposed on the example of the risk of landslide activation in the natural conditions of Kyrgyzstan, taking into account the seismicity factor. The methodology involves assessing the risk of landslide processes, evaluating the cost-effectiveness of each activities to reduce risk, and evaluating the payback period of each measure. Based on the payback period, the ranking of activities is carried out and the effectiveness of each risk reduction activities is determined. To assess the risk of landslide activation, statistical analysis was used. In this work the correlation of the relationship between landslide processes and seismic activity (the sum of the magnitudes of earthquakes) was found, a regression analysis was performed. It was shown that a satisfactory linear correlation is observed between the number of landslide processes and the sum of earthquake magnitudes from 1969 to 2010 in the Osh, Jalal-Abad and Batken regions of Kyrgyzstan. The risk of landslide processes was assessed for the village of Askaly, Alai district, Osh region of Kyrgyzstan. A number of activities are proposed to reduce the risk of landslide processes, the effectiveness and payback of these activities is evaluated. It is shown that forest reclamation protection can be considered effective in terms of costs.

### Key words:

Risk management, prediction, landslide processes, seismic activity, regression analysis, economic efficiency.

### REFERENCES

1. *Monitoring, prognozirovaniye opasnykh protsessov i yavleniy na territorii Kyrgyzskoy Respubliki* [Monitoring, forecasting hazardous processes and phenomena in the territory of Kyrgyzstan]. Bishkek, MCHS KR Publ., 2017. 743 p.
2. Ibatulin H.V. *Monitoring opolzney Kyrgyzstana* [Monitoring landslides in Kyrgyzstan]. Bishkek, MCHS KR Publ., 2011. 145 p.
3. Moldobekov B.D., Usupaev Sh.E., Abdybaev U.A., Ibatulin H.V., Sarnogoev A.K., Abdrahmanov M., Meleshko A.V. *Preduprezhdeniye riskov ot opolzney v Tsentralnoy Azii* [Prevention of landslide risks in Central Asia]. *Izvestiya KGTU im. N. Razzakova*, 2014, vol. 33, pp. 435–439.
4. Fomenko I.K. *Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti*. Diss. Dokt. nauk [The landslide hazard assessment and forecast methodology. Dr. Diss.]. Moscow, 2014. 309 p.
5. Wu S., Wang T., Shi J., Shi L., Xin P. A review of engineering landslide prevention and control. *Geological Bulletin of China*, 2013, vol. 32, no. 12, pp. 1871–1880.
6. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 2018, vol. 180, pp. 60–91.
7. Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards. *Science*, 2007, vol. 316, pp. 1136–1138.
8. Pourghasemi H.R., Teimoori Yansari Z., Panagos P., Pradhan B. Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016). *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11 (9), pp. 1–12.
9. Keefer D.K. Investigating landslides caused by earthquakes – a historical review. *Surveys in Geophysics*, 2002, vol. 23, pp. 473–510.
10. Keefer D.K. Landslides generated by earthquakes: immediate and long-term effects. *Treatise on Geomorphology: Tectonic Geomorphology*. San Diego, Academic Press, 2013. Vol. 5, pp. 250–266.
11. Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach P. Landslides, earthquakes and erosion. *Earth Planet. Sci. Letters*, 2004, vol. 229, pp. 45–59.
12. Rodriguez C.E., Bommer J.J., Chandler R.J. Earthquake-induced landslides: 1980–1997. *Soil Dyn Earthq Eng.*, 1999, vol. 18, no. 5, pp. 325–346.
13. Nowicki Jesse M.A., Hamburger M.W., Allstadt K., Wald D.J., Robeson S.M., Tanyas H., Thompson E.M. A global empirical model for near-real-time assessment of seismically induced land-

- slides. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, vol. 123, no. 8, pp. 1835–1859.
14. Nowicki M.A., Wald D.J., Hamburger M.W., Hearne M., Thompson E.M. Development of a globally applicable model for near real-time prediction of seismically induced landslides, *Engineering Geology*, 2014, vol. 173, pp. 54–65.
  15. Tanyas H., Rossi M., Alvioli M., van Westen C.J., Marchesini I. A global slope unit-based method for the near real-time prediction of earthquake-induced landslides. *Geomorphology*, 2019, vol. 327, pp. 126–146.
  16. Torgoev I.A. Landslide monitoring system in Kyrgyzstan. *Civil Security Technology*, 2013, vol. 10, no. 4 (38), pp. 68–71. In Rus.
  17. Keefer D.K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution – the 1989 Loma Prieta, California event. *Engineering Geology*, 2000, vol. 58, no. 3–4, pp. 231–249.
  18. Chen Xiaoli, Liu Chunguo. Complex seismic focus structure and earthquake-triggered landslide distribution: analysis of the 2014 Ludian Mw6.1 Earthquake in Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 2017, vol. 91, no. 2, pp. 733–734.
  19. Tian Y., Xu C., Chen J., Zhou Q., Shen L. Geometrical characteristics of earthquake-induced landslides and correlations with control factors: A case study of the 2013 Minxian, Gansu, China, Mw 5.9 event. *Landslides*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 1915–1927.
  20. Xu C., Xu X. Statistical analysis of landslides caused by the Mw 6.9 Yushu, China, earthquake of April 14, 2010. *Natural Hazards*, 2014, vol. 72, no. 2, pp. 871–893.
  21. Roback K., Clark M.K., West A.J., Zekkos D., Li G., Gallen S.F., Chamlagain D., Godt J.W. The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 Mw7.8 Gorkha earthquake. *Nepal Geomorphology*, 2018, vol. 301, pp. 121–138.
  22. *International seismological center*. Available at: <http://www.isc.ac.uk/> (accessed 25 February 2019).
  23. Ajdaraliev B.R., Ordobaev B.S., Supanaliev R.S., Sadabaeva N.Dzh., Atambek uulu M. *Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opolzney. Osnovnye polozheniya, normy i pravila* [Engineering protection of territories, buildings and structures from landslides. Basic provisions, norms and rules]. Bishkek, KRSU Publ., 2014. 199 p.
  24. Borovikov V.P. *STATISTICA. Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere* [The art of computer data analysis]. St-Petersburg, Piter Publ., 2003. 688 p.
  25. Serdyuk V.S., Bakiko E.V. *Ekonomika bezopasnosti truda* [Labor safety economics]. Omsk, OmGTU Publ., 2011. 160 p.
  26. RD 03-496-02. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke ushcherba ot avari na opasnykh proizvodstvennykh obektakh* [Guidelines for assessing damage from accidents at hazardous production facilities]. Moscow, ES NTI «Tekhekspert» Publ., 2004. 37 p.
  27. *Ob ischislenii i vzimanii platy za negativnoe vozdeystvie na okruzhayushchuyu sredu* [On the calculation and collection of fees for negative environmental impact]. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 03.03.2017 g. № 255. Available at: <http://government.ru/docs/26694/> (accessed 10 April 2020).
  28. *Ob utverzhdenii Klassifikatsii chrezvychaynykh situatsiy i kriteriev ikh otsenki v Kyrgyzskoy Respublike* [On approval of the Classification of emergency situations and criteria for their assessment in the Kyrgyz Republic]. Postanovlenie Pravitelstva Kyrgyzskoy Respubliki ot 22 noyabrya 2018 goda № 550. Available at: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/12747> (accessed 10 April 2020).
  29. *Raschetnom pokazatele* [About estimated indicator]. Zakon Kyrgyzskoy Respubliki ot 27 yanvarya 2006 goda № 13. Available at: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/1801> (accessed 10 April 2020).
  30. *Ob utverzhdenii razmera raschetnogo pokazatelya* [On approval of the size of the calculated indicator]. Postanovlenie Zhogorku Kenesha Kyrgyzskoy Respubliki ot 15 iyunya 2006 goda № 1115-III. Available at: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/51948> (accessed 10 April 2020).

Received: 15 April 2020.

#### Information about the authors

**Sergey V. Romanenko**, Dr. Sc, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ekaterina V. Larionova**, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Urmat A. Muldybaev**, undergraduate student, Kyrgyz-Russian Slavic University.

**Bolotbek R. Aydaraliev**, director of the educational scientific and technical center «Development of Civil Protection», Kyrgyz-Russian Slavic University.

**Beishenbek S. Ordobaev**, Cand. Sc., head of the department, Kyrgyz-Russian Slavic University.

УДК 622.276

## УТОЧНЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОПОСТРОЕННОЙ ЗАЛЕЖИ НЕФТИ ПУТЕМ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Козырев Никита Дмитриевич<sup>1,2</sup>,  
nikitonkozyrev@gmail.com

Кочнев Александр Александрович<sup>1,2</sup>,  
sashakoch93@gmail.com

Менгалиев Александр Генрихович<sup>2</sup>,  
mengaliev.alexandr@gmail.com

Путилов Иван Сергеевич<sup>1,2</sup>,  
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

Кривошеков Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
krivoshchekov@gmail.com

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

<sup>2</sup> Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,  
Россия, 614066, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

**Актуальность** исследования обусловлена повсеместным использованием геолого-гидродинамического моделирования для процесса проектирования разработки нефтяных и газовых месторождений. При использовании стандартного подхода создания геолого-гидродинамической модели вероятен недоучет сложности строения и неоднородности свойств коллектора, что может оказать негативное влияние на прогнозные технологические и экономические показатели разработки месторождения.

**Цель:** разработка методического подхода комплексного анализа и учета имеющейся разномасштабной промысловой и лабораторной информации при создании куба абсолютной проницаемости приоритетного месторождения.

**Объект:** сложнопостроенная карбонатная залежь нефти Восточно-Ламбейшорского месторождения.

**Методы:** оценка охвата исследованиями скважин; статистическая обработка данных исследований стандартных и полно-размерных образцов керн; переинтерпретация и комплексирование промыслово-геофизических и гидродинамических исследований скважин; создание и использование макросов в среде Visual Basic для автоматизации итерационных процессов сортировки, анализа данных и создания каротажной кривой абсолютной проницаемости; стохастическая интерполяция полученных данных с учетом сейсмической информации в геологическом симуляторе IRAP RMS (ROXAR); создание и использование фильтрационной модели в гидродинамическом симуляторе Tempest More (ROXAR).

**Результаты.** Дана характеристика пластов рассматриваемой залежи нефти, особенности геологического строения; разработан методический подход по построению и уточнению куба абсолютной проницаемости в геолого-гидродинамической модели, обеспечивающий снижение степени неопределенности свойств продуктивного пласта; проведена сравнительная характеристика двух фильтрационных моделей, созданных на основе стандартного способа учета абсолютной проницаемости и согласно предлагаемой методики; отмечена более высокая степень сходимости расчетных и фактических технологических показателей разработки при использовании разработанного методического подхода уточнения абсолютной проницаемости продуктивного пласта; с целью оценки прогнозной способности геолого-гидродинамической модели пласта использован метод ретроспективного прогноза технологических показателей разработки пласта, отмечена удовлетворительная сходимость.

### Ключевые слова:

Геолого-гидродинамическое моделирование, комплексирование результатов исследований, абсолютная и фазовая проницаемость, сложнопостроенный карбонатный коллектор, комплексная каротажная кривая абсолютной проницаемости, гидродинамические исследования, керн, потокометрические исследования.

### Введение

Постоянно действующая геолого-техническая тематическая модель пласта (ПДГТМ) в настоящее время является неотъемлемой частью методики прогнозирования процесса разработки нефтяных и газовых месторождений [1]. ПДГТМ позволяет спрогнозировать множество технологических показателей на краткосрочную и долгосрочную перспективу, таких как добыча нефти и газа, темпы обводнения, пластовое и забойное давления и множество других [2, 3]. Одним из главных достоинств применения геолого-

гидродинамических моделей при прогнозировании разработки месторождений является учет геологической неоднородности, что позволяет с высокой точностью предсказать фильтрационные и физико-химические процессы, происходящие в продуктивных пластах. Надежность и точность прогноза с помощью ПДГТМ напрямую зависит от качества и количества исходной информации, учитываемой при построении модели. Зачастую оценка и учет результатов различных методов исследования пласта осуществляется в отдельности друг от друга и в разные периоды созда-

ния ПДГТМ [4, 5]. В результате степень неопределенности свойств модели остается высокой, в том числе и при достаточном объеме информации, что оказывает негативное влияние на прогнозные технологические и экономические показатели разработки месторождения. Поэтому для обеспечения высокого качества прогнозируемой способности ПДГТМ необходим комплексный анализ всей исходной информации [6–11].

**Таблица 1.** Краткая геолого-физическая характеристика  
**Table 1.** Brief geological and physical characteristics

Параметры Parameters	Размерность Dimension	Значение $D_{3fm_1}(el)$ Value	Значение $D_{3fm_1}(zd)$ Value
Средняя глубина залегания кровли Average depth of the roof	м	абс. отм./true vertical depth – 3581,5	абс. отм/ true verti- cal depth – 3655,9
Абсолютная отметка водонефтяного контакта Oil-water contact (true vertical depth)	м	–3661,0– 3737,0	–3672,1
Тип залежи Type of deposit	–	пластово-массивная, сводовая massive, vaulted	
Тип коллектора Collector type	–	поровый, каверно-поровый pore, cavernous	
Средняя эффективная нефтенасыщенная толщина Average effective oil-saturated thickness	м	28,5	7,6
Коэффициент пористости Porosity coefficient	доли ед. fraction of units	0,08	0,07
Коэффициент нефте-насыщенности пласта Oil saturation coefficient	доли ед. fraction of units	0,79	0,70
Проницаемость Permeability	$10^{-3}$ мкм <sup>2</sup> $10^{-3}$ mkm <sup>2</sup>	93,0	24,3
Коэффициент песчанистости Net to gross	доли ед. fraction of units	0,41	0,43
Расчлененность Dissection	ед. units	13,2	4,1
Начальное пластовое давление Initial reservoir pressure	МПа/MPa	40,1	39,9
Вязкость нефти в пластовых условиях Oil viscosity in reservoir conditions	мПа*с mPa*s	0,564	0,550
Плотность нефти в поверхностных условиях Surface oil density	т/м <sup>3</sup> t/m <sup>3</sup>	0,825	0,833
Объемный коэффициент нефти Oil formation volume factor	доли ед. fraction of units	1,38	1,47
Давление насыщения нефти газом Gas saturation pressure	Мпа MPa	22,35	21,60
Газосодержание Gas-oil ratio	нм <sup>3</sup> /т nm <sup>3</sup> /t	180,8	201,7
Коэффициент вытеснения (водой) Displacement coefficient (water)	доли ед. fraction of units	0,458	0,395

Одним из важных свойств пласта, моделируемых при создании ПДГТМ, является абсолютная проницаемость, поскольку данное свойство определяет динамику пластового давления, темпы обводнения скважин, а также имеет высокую степень неопределенности, что не позволяет с допустимой точностью спрогнозировать технологические и экономические показатели разработки месторождений [12].

В данной работе представлен методический подход, позволяющий произвести комплексирование результатов разномасштабных исследований при создании и уточнении абсолютной проницаемости пласта в ПДГТМ на примере многопластового месторождения, характеризующегося сложным геологическим строением.

#### Объект исследования

В качестве объекта исследования рассмотрено Восточно-Ламбейшорское месторождение нефти. Продуктивные пласты сложены карбонатными рифовыми постройками, характеризуются сложным геологическим строением, развитием вторичных процессов. Тип залежи – пластово-массивно, сводовая, тип коллектора – поровый, каверно-поровый. Суммарные средние эффективные нефтенасыщенные толщины составляют более 35 м. Разработка месторождения на первой стадии. В табл. 1 приведена краткая геолого-физическая характеристика объекта.

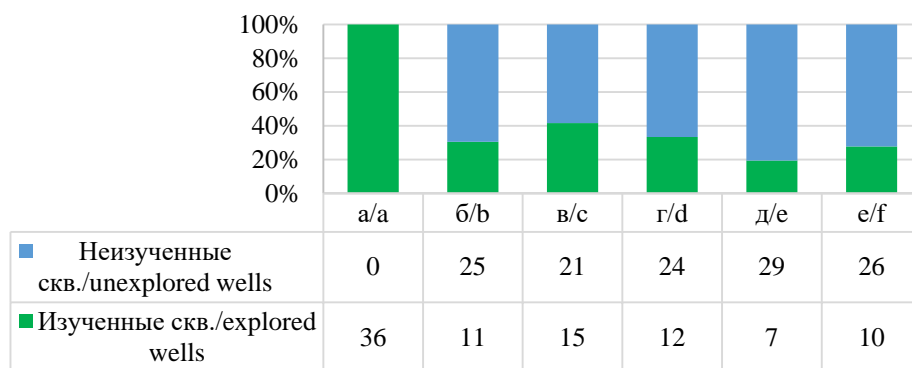
На объекте в процессе разработки залежи проведен ряд исследований, таких как керновые исследования, гидродинамические исследования скважин методами кривой восстановления давления (КВД) и индикаторных диаграмм (ИД). Также проведены промыслово-геофизические исследования скважин (ПГИ), а именно потокометрические исследования добывающих и нагнетательных скважин, стандартный комплекс геофизических исследований (ГИС), специальные исследования ГИС, такие как FMI, MCI, MDT и волновые акустические каротажи, также имеются данные по интервалам поглощения буровых растворов. Всего на объекте пробурено 36 скважин, охват перечисленными исследованиями представлен на рис. 1.

Из рисунка видно, что на всех скважинах проведен стандартный комплекс ГИС, по остальным исследованиям изучено менее 50 % скважин, однако комплексирование результатов позволит уточнить проницаемость в прискважинной и межскважинной зонах пласта.

Целью данного исследования является повышение достоверности прогноза основных технологических показателей разработки нефтяных и газовых месторождений.

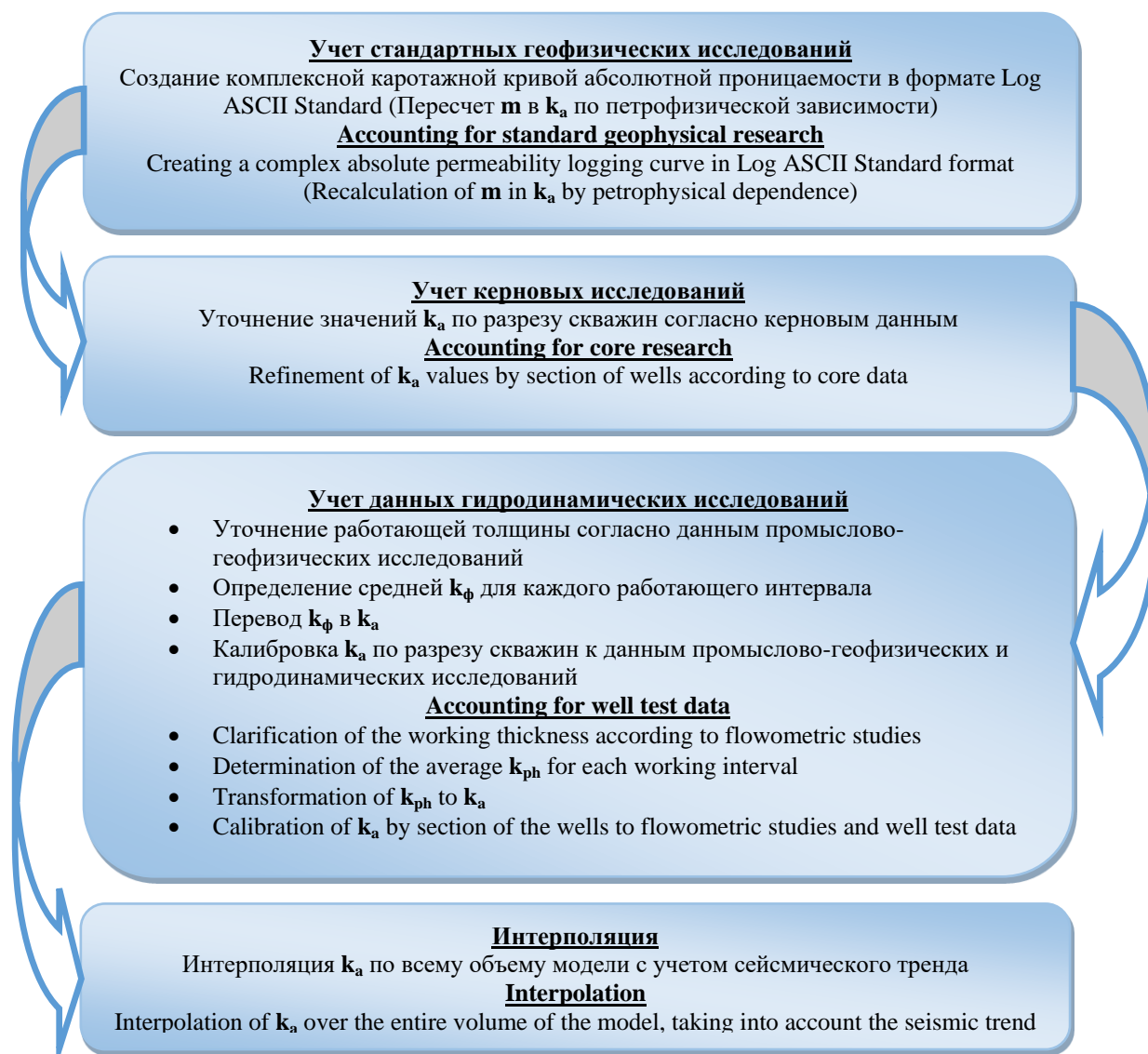
В рамках данной работы создан методический подход, обеспечивающий оптимальное использование данных исследований для снижения неопределенности фильтрационных свойств пласта.

На рис. 2 представлена блок-схема методики уточнения абсолютной проницаемости в ПДГТМ.



**Рис. 1.** Охват исследованиями добывающих и нагнетательных скважин: а) стандартный комплекс ГИС; б) исследования керна; в) гидродинамические исследования; г) потокометрические исследования; д) специальные методы геофизических исследований (азимутальный электрический микроимиджер); е) интервалы поглощения

**Fig. 1.** Research coverage of production and injection wells: a) standard complex of geophysical research of wells; b) core research; c) well test; d) flowometric studies; e) special studies (integrated formation microimager); f) intake Intervals



**Рис. 2.** Блок-схема процесса уточнения абсолютной проницаемости при моделировании продуктивных нефтяных пластов:  $k_a$  – значения абсолютной проницаемости;  $k_{ph}$  – значения фазовой проницаемости;  $m$  – открытая пористость

**Fig. 2.** Flowchart of refining absolute permeability when modeling productive oil reservoirs:  $k_a$  – absolute permeability values;  $k_{ph}$  – values of phase permeability;  $m$  – open porosity



### Создание комплексной корреляционной кривой проницаемости

На первом этапе осуществлено создание комплексной каротажной кривой абсолютной проницаемости в формате LAS (Log ASCII Standard) путем пересчета каротажной кривой пористости, исходя из петрофизической зависимости проницаемость–пористость с шагом в 10 см. Для рифовых елецких отложений  $D_3fm_1(e)$  петрофизическая зависимость имеет вид (1)

$$K_{пр} = 0,0007 * m^{4,7003}, \quad (1)$$

где  $K_{пр}$  – абсолютная проницаемость; мД;  $m$  – пористость, %.

Для задонских отложений  $D_3fm_1(zd)$  (2)

$$K_{пр} = 0,0006 * m^{4,5296}, \quad (2)$$

Необходимо отметить, что для карбонатных сложнопостроенных коллекторов с вторичными образованиями зависимость проницаемость–пористость имеет низкую корреляцию, при одних и тех же значениях пористости наблюдается значительный разброс значений абсолютной проницаемости (рис. 3).

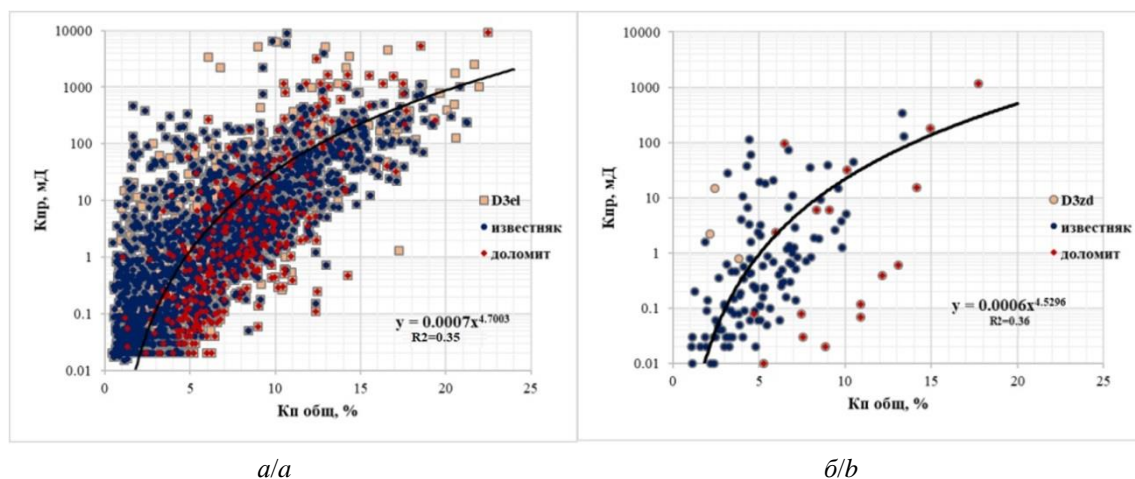


Рис. 3. Петрофизические зависимости проницаемость–пористость для отложений: а)  $D_3(e)$ ; б)  $D_3(zd)$

Fig. 3. Petrophysical relationships permeability–porosity for deposits: a)  $D_3(e)$ ; b)  $D_3(zd)$

В табл. 2 представлены среднее значение и диапазон значений проницаемости, полученной по петрофизической зависимости (ГИС), керну и ГДИ в интервалах перфорации одной из изученных скважин. Среднее значение проницаемости по ГИС в интервале перфорации отличается в два раза от значений, полученных по результатам исследований керна и ГДИ. Средние значения по керну и ГДИ достаточно близки, однако необходимо отметить, что проницаемость, полученная по результатам гидродинамических исследований, является фазовой, следовательно, для корректного сопоставления необходимо осуществить перевод фазовой проницаемости в абсолютную.

При построении корреляционной кривой абсолютной проницаемости для одной из скважин наблюдаются значительные отклонения проницаемости, полученной по результатам исследований стандартных и полноразмерных образцов керна от петрофизической зависимости (рис. 4).

Распределение абсолютной проницаемости по разрезу скважины имеет усредненную характеристику и недостаточно детально воспроизводит неоднородность реального пласта, так как не в полной мере учитывает имеющийся объем промысловой информации.

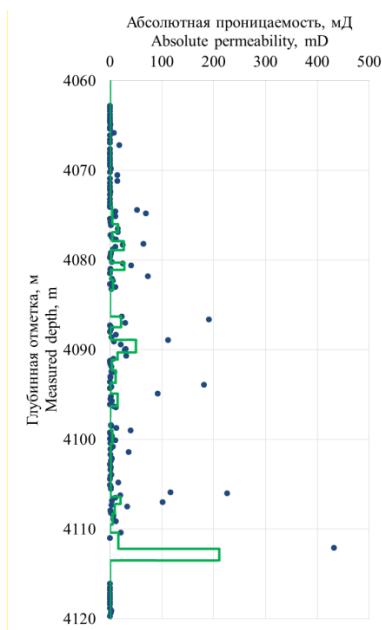
Также для оценки устойчивости зависимости построен кросс-плот значений абсолютной проницаемости, полученных по петрофизической зависимости и керну.

Таким образом, можно сделать вывод, что исходная проницаемость, полученная по петрофизической зависимости, не сможет отразить фактические процессы фильтрации. Полученный разрез по абсолютной проницаемости необходимо уточнять прямыми исследованиями керна, исследованиями ГДИ, потокометрическими и другими исследованиями.

Таблица 2. Сопоставление значений проницаемости в интервале перфорации скважины

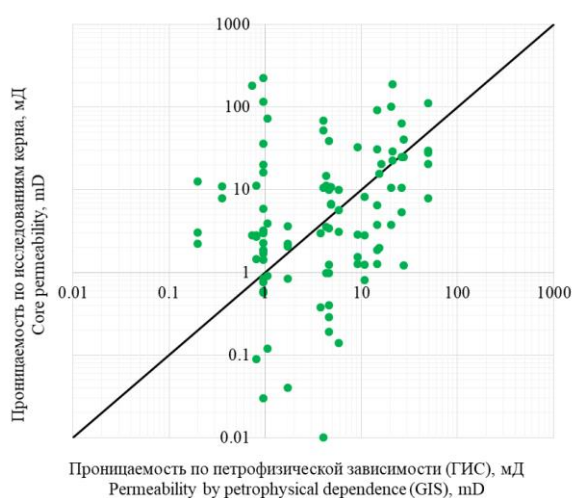
Table 2. Comparison of permeability values in the perforated interval

Вид исследования Study type	Петрофизическая зависимость (ГИС) Petrophysical dependence (well logging)	Прямые исследования керна Core research	Гидродинамические исследования Hydrodynamic research
Среднее значение проницаемости в интервале перфорации, мД Average value of permeability in the perforation interval, mD	9,09	18,04	20,1
Min-Max, мД/мД	0,19–49,99	0,01–225,82	–



**Рис. 4.** Корреляционная кривая абсолютной проницаемости по скважине. Зеленая линия – абсолютная проницаемость, полученная по петрофизической зависимости; Синие точки – абсолютная проницаемость, полученная по керну

**Fig. 4.** Correlation curve of absolute permeability along the well. Green line – absolute permeability obtained from petrophysical dependence; Blue dots – absolute permeability obtained from core



**Рис. 5.** Кросс-плот проницаемости петрофизическая зависимость – керн

**Fig. 5.** Cross-plot of permeability petrophysical dependence – core

#### Учет результатов керновых исследований

На следующем этапе с целью уточнения значений проницаемости по вертикальному разрезу скважин проанализирован весь керновый материал. В табл. 3 представлена общая статистика по абсолютной проницаемости и пористости по стандартным и полно-размерным образцам керна для всех скважин. Из таблицы видно, что объект имеет высокую неоднород-

ность, так как значения проницаемости имеют высокую дисперсию и стандартное отклонение в отличие от значений пористости.

**Таблица 3.** Общая статистика значений абсолютной проницаемости и пористости по результатам обработки керна

**Table 3.** General statistics of absolute permeability and porosity based on core processing

Параметр Parameter	Вид образца Sample type	N набл. N of observations	Средн. Avg.	Медиана Median	Min	Max	Дисперсия Dispersion	Стандартное отклонение Standard deviation
m, д. ед	Стандарт. Standart	861	6,8	6,1	0,4	21,2	17,2	4,1
	Полно-раз. Full size	161	8,2	7,8	0,5	21,4	13,4	3,7
К, мД	Стандарт. Standart	861	49,9	2,7	0,1	4527,1	59922,8	244,8
	Полно-раз. Full size	161	220,1	7,4	0,1	11543,0	1387353,4	1177,9

Ввиду того, что зависимости проницаемость–пористость неустойчивы, произведено уточнение значений по разрезу путем замены на проницаемость, определенную по керну в интервалах отбора материала (рис. 6).

#### Комплексирование гидродинамических и потокометрических исследований

Далее выполнен комплексный анализ гидродинамических и потокометрических исследований скважин. Исходя из заключений по снятию кривой восстановления давления, проницаемость определена через гидропроводность (3)

$$K_{пр} = \frac{\varepsilon \cdot \mu}{h}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – гидропроводность пласта, мД\*м/мПа\*с;  $\mu$  – динамическая вязкость флюида, мПа\*с;  $h$  – суммарная вскрытая толщина, м.

При анализе потокометрических исследований выявленная работающая толщина зачастую меньше вскрытой, так как по разрезу встречаются пропластки с низкими фильтрационными и емкостными свойствами либо субколлекторы [13]. В результате пересчета только на работающую толщину общая проницаемость возрастает. Потокометрические исследования позволяют определить вклад каждого из работающих интервалов в общий приток к скважине, следовательно, в соответствии с представлением слоисто-неоднородного пласта суммарный дебит скважины можно рассматривать как сумму дебитов по выявленным пропласткам (4)

$$Q = \Sigma Q_i = \Sigma k_i h_i * \frac{2\pi}{\mu} \frac{P_k - P_c}{\ln \frac{R_k}{r_c} + S} = \Sigma k_i h_i * X = kh, \quad (4)$$

где  $Q$  – дебит скважины перед остановкой, м<sup>3</sup>/сут;  $P_k$  – давление на контуре питания (пластовое), МПа;  $P_c$  – забойное давление в скважине перед остановкой, МПа;  $R_k$  – радиус контура питания (зоны дренирования), м;  $r_c$  – радиус скважины по долоту, м;  $S$  – суммарный скин-фактор, д. ед.

Параметры с индексом  $i$  означают принадлежность к пропластку. Поскольку для наиболее обоснованного расчета влияния дебита слоя на общий поток, для каждого пропластка необходимо знать пластовое дав-

ление, скин-фактор и т. д., необходимо проводить дорогостоящие опробования пластов на кабеле (ОПК), например, с помощью прибора Modular Dynamics Tester (MDT), которые не всегда являются оправданными, применена экспресс-методика. Считая, что параметр  $X$  одинаков во всех слоях, можно определить проницаемость каждого пропластка. В табл. 4 представлен результат расчета проницаемости для каждого работающего интервала на примере скважины № 2 Восточно-Ламбейшорского месторождения.

**Таблица 4.** Распределение средней проницаемости с учетом потокометрических исследований

**Table 4.** Distribution of average permeability taking into account flowmetric studies

Интервал перфорации, м Perforation interval, m (measured depth)	Работающие интервалы, м Working intervals, m (measured depth)	Средняя проницаемость для интервала перфорации, мД Average permeability for perforation interval, mD	Средняя проницаемость для работающего интервала, мД Average permeability for working interval, mD	Средняя проницаемость в работающем интервале, мД Average permeability in working interval, mD	
4074,0–4111,0	4074,0–4075,7	20,1	39,5	$k_1$	13,5
	4076,3–4078,8			$k_2$	22,2
	4083,7–4085,0			$k_3$	41,2
	4085,6–4087,4			$k_4$	23,2
	4087,4–4089,7			$k_5$	64,4
	4091,0–4092,0			$k_6$	20,8
	4094,0–4095,8			$k_7$	16,6
	4098,0–4099,9			$k_8$	9,9
	4104,0–4106,0			$k_9$	17,4
	4108,5–4110,0			$k_{10}$	35,7
	4110,0–4111,0			$k_{11}$	215,4

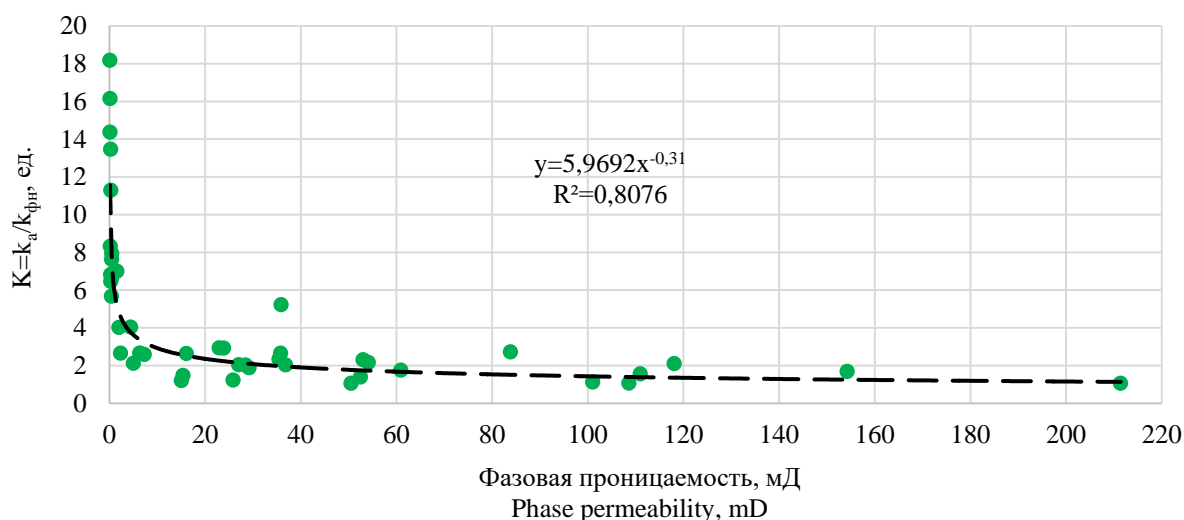
При отсутствии восстановленных КВД можно использовать результаты интерпретации КСД (кривой стабилизации давления), поскольку время исследования в данном случае чаще всего намного больше, сравнение проницаемости по двум методам показывает их хорошую сходимость [14].

Необходимо отметить, что проницаемость, полученная в результате исследований ГДИ, является фазовой. При геолого-гидродинамическом моделировании чаще всего задается абсолютная проницаемость. Для дальнейшей калибровки комплексной кривой абсолютной проницаемости на данные ГДИ необходимо осуществить перевод фазовой проница-

емости в абсолютную на основе анализа прямых определений фазовых проницаемостей для образцов керна [15]. Определено отношение абсолютной к фазовой проницаемости при 100 % фильтрации нефти, так как до проведения гидродинамического исследования скважина работала на безводном режиме

$$K = \frac{k_a}{k_{\text{фн}}}, \quad (5)$$

где  $k_a$  – абсолютная газопроницаемость по керну, мД;  $k_{\text{фн}}$  – фазовая проницаемость по нефти, определенная на керне, мД.



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента отношения проницаемостей от фазовой проницаемости

**Fig. 6.** Dependence of the permeability ratio coefficient on phase permeability

Всего проанализировано 45 образцов керн с проницаемостью от 1,83 до 211,6 мД. На рис. 6 представлена зависимость коэффициента отношения (5) от фазовой проницаемости. Из зависимости наблюдается значительный рост коэффициента отношения при проницаемости менее 5 мД, что связано с капиллярными силами и межзатонным взаимодействием фильтрующей жидкости и породы. Коэффициент корреляции составляет 0,898, что подтверждает устойчивость зависимости.

Исходя из полученной зависимости, осуществлен пересчет фазовой проницаемости, определенной по результатам ГДИ и потокометрии, в абсолютную для скважины № 2 (табл. 5).

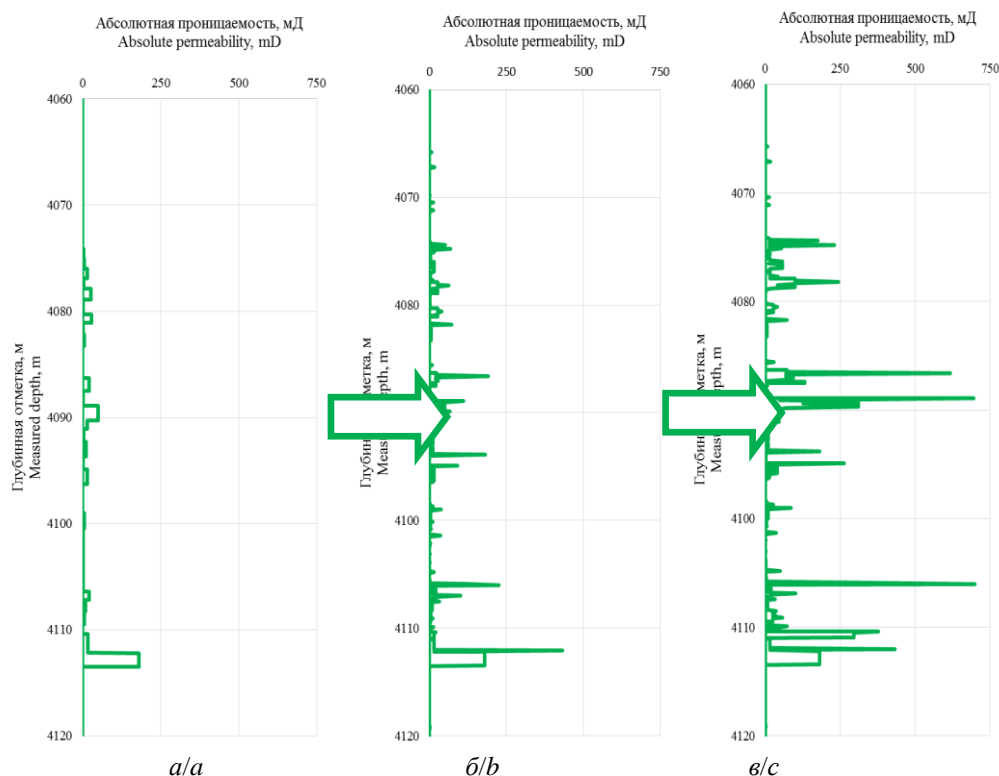
Далее произведена калибровка ранее полученной корреляционной кривой проницаемости путем сопоставления с пересчитанной абсолютной проницаемостью по разрезу согласно результатам ГДИ и потокометрических исследований. На рис. 7 представлен весь процесс уточнения комплексной каротажной кривой проницаемости и калибровка на данные гидродинамических и потокометрических исследований.

Аналогичная процедура проведена для всех изученных скважин, что позволяет выполнить интерполяцию по всему объему гидродинамической модели пласта.

**Таблица 5.** Результаты пересчета фазовой проницаемости в абсолютную

**Table 5.** Results of the conversion of phase permeability to absolute

Работающие интервалы, м Working intervals, m	Средняя фазовая проницаемость в работающем интервале, мД Average phase permeability in the working interval, mD		$k_a/k_{фн}$ , ед. $k_a/k_{pho}$ , un.	Пересчитанная абсолютная проницаемость, мД Recalculated absolute permeability, mD
4074,0–4075,7	$k_1$	13,5	2,66	36,0
4076,3–4078,8	$k_2$	22,2	2,28	50,7
4083,7–4085,0	$k_3$	41,2	1,88	77,7
4085,6–4087,4	$k_4$	23,2	2,25	52,3
4087,4–4089,7	$k_5$	64,4	1,64	105,7
4091,0–4092,0	$k_6$	20,8	2,33	48,5
4094,0–4095,8	$k_7$	16,6	2,50	41,5
4098,0–4099,9	$k_8$	9,9	2,93	29,0
4104,0–4106,0	$k_9$	17,4	2,46	42,8
4108,5–4110,0	$k_{10}$	35,7	1,97	70,3
4110,0–4111,0	$k_{11}$	215,4	1,13	243,1



**Рис. 7.** Полный процесс уточнения комплексной каротажной кривой абсолютной проницаемости согласно результатам: а) геофизических исследований и петрофизической зависимости; б) геофизических исследований, петрофизической зависимости и прямых исследований керн; в) геофизических исследований, петрофизической зависимости, прямых исследований керн, гидродинамическим и потокометрическим исследованиям

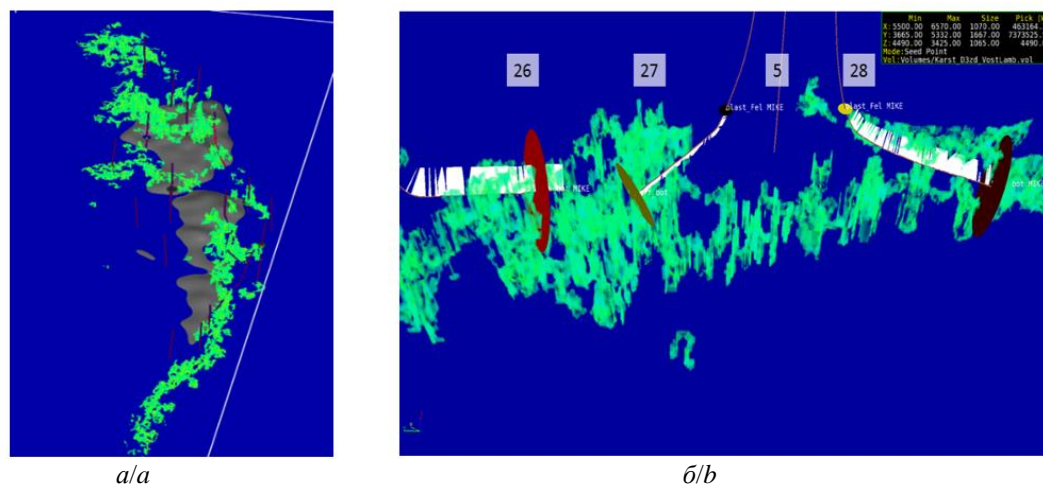
**Fig. 7.** Full process of refining the complex absolute permeability logging curve according to the results of: a) well logging and petrophysical dependence; b) well logging, petrophysical dependence and direct core studies; c) well logging, petrophysical dependence, direct core studies, well test and flowmetric studies



### Интерполяция по объему модели

Для корректной интерполяции использован сейсмический атрибут когерентности, на основе которого получен куб карстовых пустот. Использование сейсмических атрибутов для прогноза распространения коллекторских свойств в межскважинном

пространстве описано в работах [16–22]. На рис. 8 представлен куб карстовых пустот, где зеленым цветом выделены зоны с предположительными зонами развития палеокарста с повышенной проницаемостью относительно остального объема продуктивного пласта.

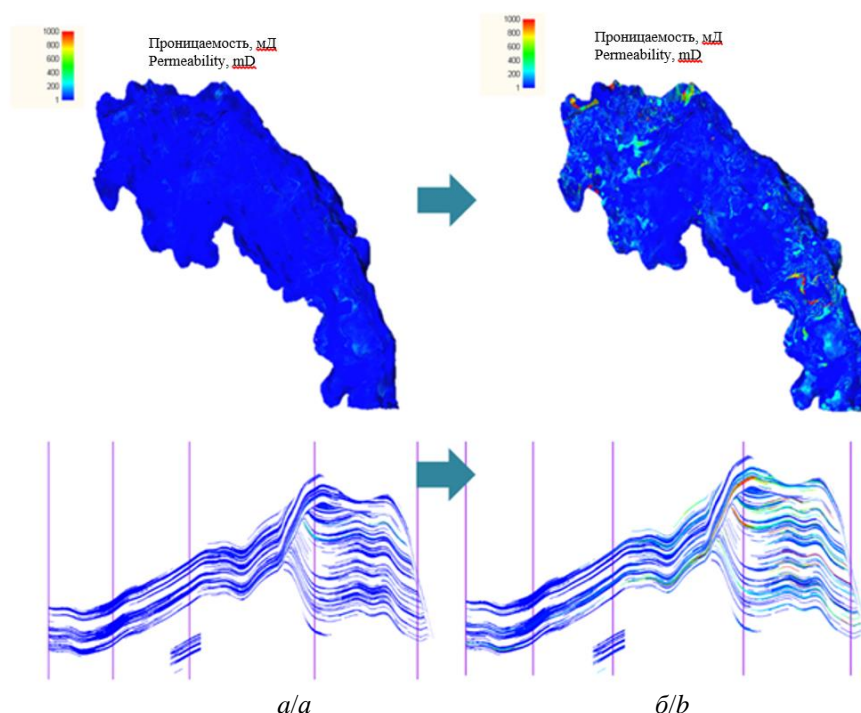


**Рис. 8.** Куб карстовых пустот, характеризующий зоны развития палеокарста: а) план; б) произвольный разрез  
**Fig. 8.** Cube of karst voids characterizing the zones of development of paleokarst: a) plan; b) arbitrary cut

Отмечается, что зоны предполагаемого развития карста приурочены к гребню органогенного комплекса и имеют неравномерное развитие по простиранию и по глубине проявления. В качестве метода интерполяции выбрано стохастическое моделирование с использованием тренда по кубу сейсмического атрибута.

Далее проведен визуальный и статистический анализ куба абсолютной проницаемости в геолого-

гидродинамической модели пласта, созданной стандартной методикой, то есть путем пересчета куба пористости через петрофизическую зависимость, с проницаемостью после комплексирования результатов исследований. Среднее значение абсолютной проницаемости возросло в два раза, а максимальное значение – в 4,5 раза (рис. 9).



**Рис. 9.** Визуальная характеристика кубов абсолютной проницаемости: а) стандартная методика; б) комплексирование  
**Fig. 9.** Visual characteristic of absolute permeability cubes: a) standard technique; b) proposed methodology

### Проверка эффективности методического подхода

На следующем этапе осуществлена проверка эффективности предлагаемой методики. Проведена сравнительная характеристика результатов воспроизведения истории разработки гидродинамической модели, где аб-

солютная проницаемость построена стандартным способом для начальной стадии создания модели пласта и модели, где проведено комплексирование результатов исследований (табл. 6). Задача выполнена одноитерационно, дополнительной настройки ПДГТМ не осуществлялось.

**Таблица 6.** Сравнительная характеристика результатов воспроизведения истории разработки на моделях

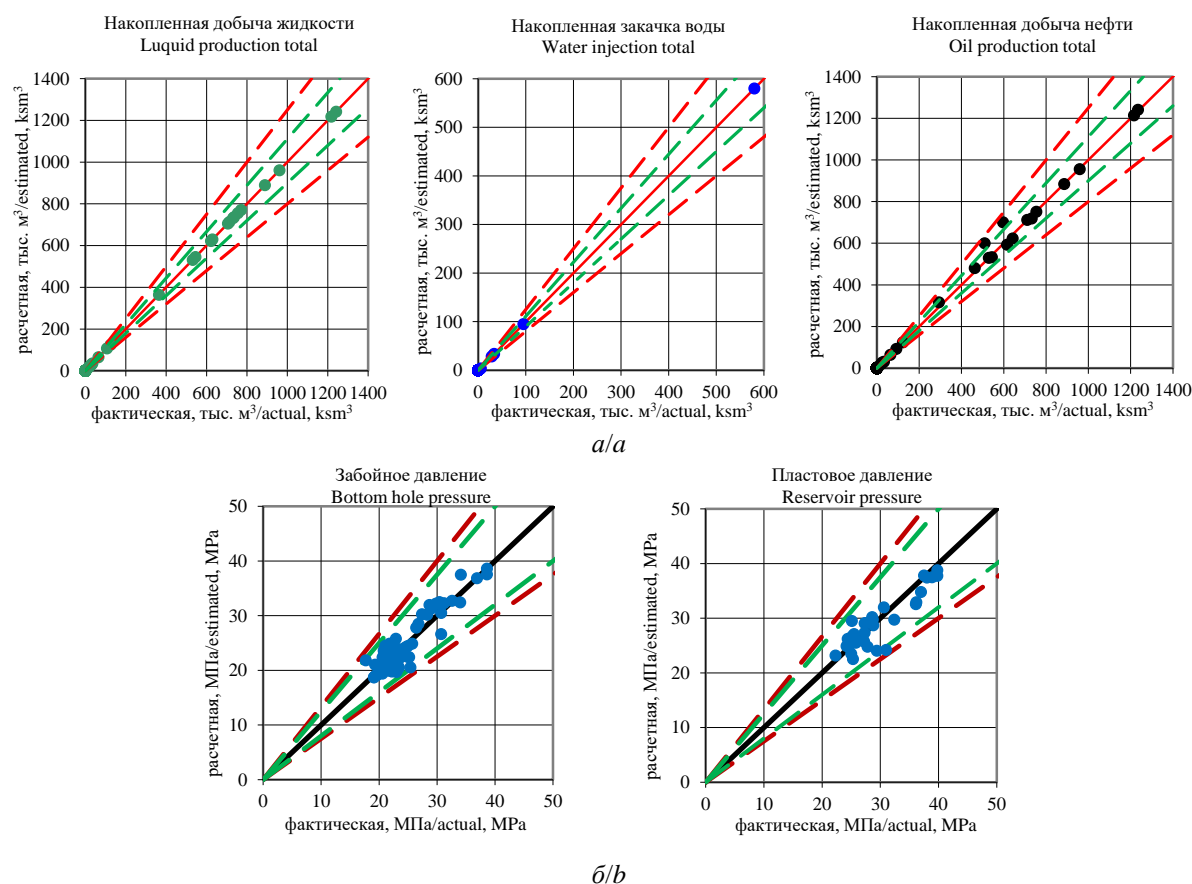
**Table 6.** Comparative characteristics of the results of reproducing the development history on models

Метод создания гидродинамической модели Method for creating the hydrodynamic model	Показатель Indicator	Факт Fact	Расчет Calculation	Ошибка, % Error, %
стандартная методика/standard method	Накопленная добыча нефти, тыс. т Oil production total, kt	9123,1	5874,2	35,6
комплексирование/integration			7854,7	13,9
стандартная методика/standard method	Накопленная жидкости нефти, тыс. т Liquid production total, kt	9996,2	6216,2	37,8
комплексирование/integration			8375,7	16,2

Применение комплексирования результатов исследований позволило с большей точностью воспроизвести фактические накопленные отборы жидкости и нефти в целом по изучаемому месторождению. Поэтому модель с учетом модифицированного куба проницаемости может являться основой для дальнейшей поскважинной адаптации. Задачей адаптации является воспроизведение истории разработки – ди-

намики технологических показателей, настройка трендов пластового и забойного давления [23–30].

По результатам дальнейшей поскважинной адаптации накопленное отклонение по нефти за весь период истории объекта разработки составляет 1,9 %, за последний год – 1,1 %. Качество поскважинной адаптации ПДГТМ можно оценить с помощью кросс-плотов (рис. 10).



**Рис. 10.** Сопоставление фактических и расчетных показателей по скважинам за весь период разработки: а) накопленная добыча и закачка, б) пластовые и забойные давления; красная пунктирная линия – руководящий документ по созданию и приемке гидродинамических моделей государственными органами; зеленая пунктирная линия – руководящий документ по созданию и приемке гидродинамических моделей в рамках бизнес-процесса «Интегрированное моделирование»

**Fig. 10.** Comparison of actual and calculated indicators for wells for the entire development period: a) total production and injection, b) bottom hole and reservoir pressures; red dashed line is a guiding document on creation and acceptance of the model by government bodies; the green dashed line is a guiding document on creation and acceptance of a model as part of «the Integrated Modeling business process»

### Ретроспективный прогноз

Основной задачей построения ПДГТМ является прогнозирование показателей, также выработка рекомендаций по дальнейшему регулированию разработки месторождений нефти и газа. С целью оценки прогнозной способности модели решено провести ретроспективный анализ сходимости фактических и расчетных показателей [31, 32].

В фильтрационной модели искусственным образом осуществлена остановка расчета на 01.12.2018, далее запущен краткосрочный период прогнозирования до 01.06.2019. Вывод фактических скважин на прогноз осуществлен на режиме заданной контроли-

руемой депрессии, соответствующей фактической на последнюю дату исторического периода, то есть на 01.12.2018. Ограничения на прогнозные дебиты по нефти и жидкости в модель не задавались.

Для оценки качества сходимости ретроспективного прогноза с фактическими данными проведен анализ параметра месячной добычи нефти по всем добывающим скважинам. Из рис. 11 видно, что ретроспективный прогноз с высокой точностью воспроизводит фактическую динамику месячной добычи нефти, что подтверждает способность усовершенствованной модели к прогнозированию.

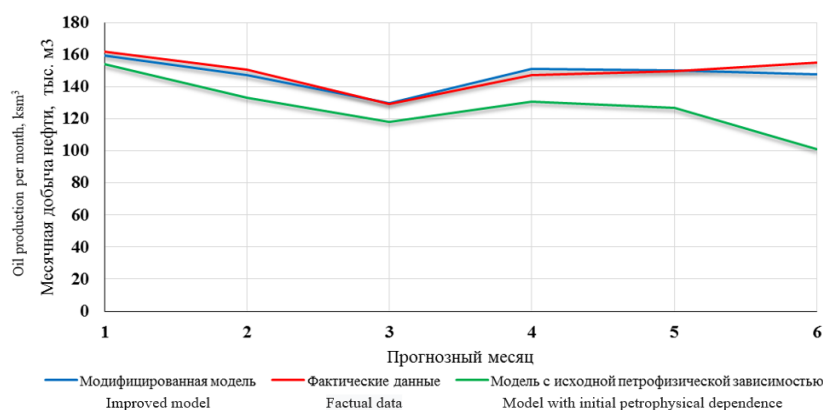


Рис. 11. Сравнительный анализ результатов ретроспективного прогноза по параметру «месячная добыча нефти»

Fig. 11. Comparative analysis of the results of the retrospective forecast for the monthly oil production

Для оценки технологической эффективности предлагаемого методического подхода комплексирования результатов разномасштабных исследований фильтрационных свойств пласта произведен сравнительный анализ ретроспективного прогноза с моделью, созданной стандартным способом. Необходимо отметить, для стандартной модели процент отклонения от фактических данных имеет нарастающий характер. На 01.06.2019 отклонение составляет 58,3 тыс. м³ (или 35,2 %), что свидетельствует о занижении потенциала добычи нефти на прогнозный период в сравнении с усовершенствованной моделью.

### Заключение

В условиях роста доли трудноизвлекаемых запасов актуальным вопросом является разработка сложнопостроенных коллекторов. При стандартном подходе создания постоянно действующих геолого-технологических моделей не учитываются особенности строения, а также вторичные преобразования порового пространства, в результате нарушаются представления о процессах фильтрации, что приводит к высокой погрешности при прогнозировании добычи нефти и газа. В данной работе предложен детальный методический подход, позволяющий произвести ком-

плексирование разномасштабных исследований фильтрационных свойств пласта. Комплексный анализ позволил значительно упростить настройку модели, отвечающую регламентирующим документам по созданию и приёму гидродинамических моделей в Центральной комиссии по разработке месторождений полезных ископаемых и для целей интегрированного моделирования. Учет всех скважинных исследований позволяет снизить степень неопределенности проницаемости и более точно оценить фильтрационные процессы, происходящие при разработке объекта, в результате повысилось качество модели и её прогнозная надежность.

Предложенная методика комплексирования является универсальной и может быть тиражирована для всех месторождений нефти с разной степенью изученности.

В дальнейших работах планируется создание единой базы данных с целью автоматизации процесса комплексирования результатов разномасштабных исследований скважин.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция эффективного проектирования разработки месторождений углеводородов. Программные решения / А.С. Гавриш, В.П. Косяков, А.Ю. Боталов и др. // Нефтепромысловое дело. – 2015. – № 11. – С. 75–85.
2. Баширова А.М., Яркиева Н.Р. Цифровая фильтрационная модель как способ прогнозирования показателей работы проектных скважин на примере пласта БВ81 Северо-Покурского месторождения // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 4. – С. 97–102.



3. Закиров Р.Х. Роль геолого-гидродинамического моделирования при проектировании разработки нефтяных месторождений // Георесурсы. – 2009. – № 4. – С. 34–36.
4. Гидродинамический и геофизический мониторинг разработки сложнопостроенных месторождений углеводородов / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, Д.Н. Гуляев и др. // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 68–72.
5. Репина В.А. Возможность учета плотности породы при моделировании проницаемости в геолого-гидродинамической модели нефтяных месторождений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – № 2. – С. 104–112.
6. Репина В.А., Галкин В.И., Галкин С.В. Применение комплексного учета петрофизических характеристик при адаптации геолого-гидродинамических моделей (на примере визейской залежи Гондыревского месторождения нефти) // Записки горного института. – 2018. – № 231. – С. 268–274.
7. Комплексный подход к адаптации и прогнозу параметров вторичной пустотности для нефтяного месторождения имени Р. Требса / А.А. Гимазов, Е.Е. Фокеева, Р.У. Хайруллин, Д.М. Миниханов // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 10. – С. 20–23.
8. Ардисламова Д.Р., Салимгареева Э.М., Галлямова Д.Ч. Комплексный подход к моделированию естественной трещиноватости в карбонатных коллекторах // SPE. – 2015. – № 176639. – С. 1–17.
9. Дикалов Д.В. Комплексный подход к созданию постояннодействующей геолого-технологической модели (на примере Западно-Тугровского месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 9. – С. 34–40.
10. Боженик Н.Н., Белкина В.А., Стрекалов А.В. Геологическая модель выкуловских отложений с учетом анализа связности коллектора и данных по горизонтальным скважинам // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 30–44.
11. Исследование процессов фильтрации воды в пористой среде методами физического и численного моделирования / К.В. Белов, А.Б. Лисенков, А.Д. Пономарев, Н.С. Горбатенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 64–74.
12. Викторин В.Д. Влияние особенностей карбонатных коллекторов на эффективность разработки нефтяных залежей. – М.: Изд-во «Недра», 1988. – 150 с.
13. Эрлагер Р. Гидродинамические методы исследования скважин. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. – 512 с.
14. Мартюшев Д.А., Слушкина А.Ю. Оценка информативности определения фильтрационных параметров пласта на основе интерпретации кривых стабилизации давления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 26–32.
15. Klinkenberg L.J. The permeability of porous media to liquids and gases // Am. Petroleum Inst. Drilling and Production Practice. – 1941. – P. 200–213.
16. Takougang E.M.T., Bouzidi Y., Ali M.Y. Characterization of small faults and fractures in a carbonate reservoir using waveform inversion, reverse time migration, and seismic attributes // Journal of Applied Geophysics. – 2019. – V. 161. – P. 116–123.
17. Integration of seismic attributes and production data for infill drilling strategies – a virtual intelligence approach / P. Thararoop, Z. Karpyn, A. Gitman, T. Ertekin // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2008. – V. 63. – Iss. 1–4. – P. 43–52.
18. Iturrarán-Viveros U., Parra J. O. Artificial neural networks applied to estimate permeability, porosity and intrinsic attenuation using seismic attributes and well-log data // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – V. 107. – P. 45–54.
19. Seismic strategy for predicting highly profitable wells in the fractured-vuggy carbonate reservoirs / P. Yang, Z. Sun, X. Liang, H. Li, G. Dan // Petroleum Exploration and Development. – 2013. – V. 40. – Iss. 4. – P. 537–541.
20. Boadu F.K. Predicting the transport properties of fractured rocks from seismic information: numerical experiments // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – V. 44. – Iss. 2–3. – P. 103–113.
21. Classification and identification of hydrocarbon reservoir lithofacies and their heterogeneity using seismic attributes, logs data and artificial neural networks / M. Raeesi, A. Moradzadeh, F.D. Ardejani, M. Rahimi // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 82–83. – P. 151–165.
22. Zhen Yin, Tao Feng, Colin MacBeth. Fast assimilation of frequently acquired 4D seismic data for reservoir history matching // Computers & Geosciences Volume. – 2019. – Iss. 128. – P. 30–40.
23. Регламент составления проектных технологических документов на разработку нефтяных и газонефтяных месторождений: РД 153-39-007-96/1997. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 11.11.2019).
24. Оленчиков Д.М. Интерактивный пошаговый расчет как основа методов автоматизации адаптации гидродинамических моделей с большим числом скважин // Научно-технический вестник ОАО НК «РОСНЕФТЬ». – 2007. – № 2. – С. 38–40.
25. Боженик Н.Н., Стрекалов А.В. Некоторые приемы адаптации гидродинамической модели к истории разработки // Нефтегазовое дело. – 2016. – № 2. – С. 42–49.
26. Обработка геолого-промысловой информации с применением нейронных сетей при адаптации геолого-технологических моделей на историю разработки / А.В. Красовский, С.Ю. Свентский, З.Н. Шандрыголов, Е.С. Зимин // Бурение и нефть. – 2014. – № 10. – С. 44–46.
27. Osho Ihamah. A multiobjective dominance and decomposition algorithm for reservoir model history matching // Petroleum. – 2019. – V. 5. – Iss. 4. – P. 352–366.
28. A random forests-based sensitivity analysis framework for assisted history matching / Akmal Aulia, Daein Jeong, Ismail Mohd Saaid, Dina Kania, Noaman A. El-Khatib // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 181. – Article 106237.
29. Multi-data reservoir history matching for enhanced reservoir forecasting and uncertainty quantification / K. Katterbauer, S. Arango, Sh. Sun, I. Hoteit // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – V. 128. – P. 160–176.
30. History matching and production optimization of water flooding based on a data-driven interwell numerical simulation model / Hui Zhao, Ying Li, Shuyue Cui, Genhua Shang, Huazhou Andy Li // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 3. – P. 48–66.
31. Vink J.C., Gao G., Chen C. Bayesian style history matching: another way to under-estimate forecast uncertainty // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, Texas, USA, 2015. – P. 5803–5821.
32. Построение анизотропной гидродинамической модели и исследование влияния анизотропии проницаемости на примере моделирования блока месторождения / Р.И. Еремков, М.О. Коровин, В.П. Меркулов, О.С. Чернова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 86–93.

Поступила 23.09.2020 г.

#### Информация об авторах

**Козырев Н.Д.**, аспирант кафедры нефтегазового инжиниринга Пермского национального исследовательского политехнического университета; инженер 1 категории отдела мониторинга гидродинамических моделей месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

**Кочнев А.А.**, аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета; инженер 2 категории отдела создания и мониторинга гидродинамических моделей приоритетных месторождений филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

**Менгалиев А.Г.**, инженер 2 категории отдела создания и мониторинга гидродинамических моделей приоритетных месторождений филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

**Путилов И.С.**, доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазового инжиниринга Пермского национального исследовательского политехнического университета; заместитель директора филиала по научной работе в области геологии филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

**Кривошеков С.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

## REFINEMENT OF THE GEOLOGICAL AND HYDRODYNAMIC MODEL OF A COMPLEX OIL RESERVOIR BY MEANS OF A COMPREHENSIVE DATA ANALYSIS

**Nikita D. Kozyrev**<sup>1,2</sup>,  
nikitonkozyrev@gmail.com

**Alexandr A. Kochnev**<sup>1,2</sup>,  
sashakoch93@gmail.com

**Alexandr G. Mengaliev**<sup>2</sup>,  
mengaliev.alexandr@gmail.com

**Ivan S. Putilov**<sup>1,2</sup>,  
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

**Sergey N. Krivoshchekov**<sup>1</sup>,  
krivoshchekov@gmail.com

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

<sup>2</sup> Branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm,  
29, Sovetskoy Armii street, Perm, 614066, Russia.

**The relevance** of research is caused by the widespread use of geological and hydrodynamic modeling for design of the development of oil and gas fields. Using the standard approach to creating a geological and hydrodynamic model, it is likely that the complexity of the structure and heterogeneity of the reservoir properties are underestimated, which can negatively affect the forecasted technological and economic indicators of field development.

**The main aim** of the research is to develop a methodological approach for the comprehensive analysis and accounting of the available multiscale field and laboratory information when creating a cube of absolute permeability of a priority field.

**Object:** complex carbonate oil reservoir of the Vostochno-Lambeyshorskoe field.

**Methods:** assessment of well coverage; statistical processing of research data of standard and full-sized core samples; reinterpretation and integration of field-geophysical and hydrodynamic studies of wells; creation and use of macros in the Visual Basic environment to automate iterative data analysis processes; stochastic interpolation of the received data taking into account seismic information in the geological simulator IRAP RMS (ROXAR); creation and use of a filtration model in the Tempest More hydrodynamic simulator (ROXAR).

**Results.** The paper gives the characteristic of the layers of the oil reservoir under consideration, the features of the geological structure. The authors have developed the methodological approach to construction and refinement of the absolute permeability cube in the geological and hydrodynamic model, which reduces the degree of uncertainty of the properties of the reservoir. A comparative characteristic of two filtration models created on the basis of a standard method of accounting for absolute permeability and according to the proposed methodology was carried out. A higher degree of convergence of the calculated and actual technological indicators of development is noted, when using the developed methodological approach to clarify the absolute permeability of the reservoir. In order to assess the predictive ability of the geological and hydrodynamic model of the formation, the method of retrospective forecasting of technological parameters of the development of the formation is used, satisfactory convergence is noted.

### Key words:

Geological and hydrodynamic modeling, comprehensive research results, absolute and phase permeability, complex carbonate reservoir, complex absolute permeability logging curve, well test, core, flowmetric studies.

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

### REFERENCES

- Gavris A.S., Kosyakov V.P., Botalov A.Yu. The concept of effective design of hydrocarbon fields development. Software solutions. *Oilfield engineering*, 2015, no. 11, pp. 75–85. In Rus.
- Bashirova A.M., Yarkeeva N.R. Digital filtration model as a method for predicting the indicators of project wells on example of a BV<sub>8</sub><sup>1</sup> formation, Severo-Pokursky field. *Petroleum Engineering*, 2015, no. 4, pp. 97–102. In Rus.
- Zakirov R.Kh. Role of geological-hydrodynamic modelling at designing of oil field development. *Georesources*, 2009, no. 4, pp. 34–36. In Rus.
- Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I., Gulyaev D.N. Reservoir surveillance when hard-to-recover reserves developing. *Oil Industry*, 2015, no. 9, pp. 68–72. In Rus.
- Repina V.A. How to consider rock density in fluid flow model of oil fields during permeability modelling. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2017, no. 2, pp. 104–112. In Rus.
- Repina V.A., Galkin V.I., Galkin S.V. Complex petrophysical correction in the adaptation of geological hydrodynamic models. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 268–274. In Rus.
- Gimazov A.A., Fokeeva E.E., Khairullin R.U., Minikhanov D.M. Integrated approach to adapting and forecasting the parameters of secondary porosity for the R. Trebs oilfield. *Oil Industry*, 2018, no. 10, pp. 20–23. In Rus.
- Ardislamova D.R., Salimgareeva E.M., Gallyamova D.Ch. Integrated approach to modelling naturally fractured carbonate reservoirs. *SPE*, 2015, no. 176639, pp. 1–17. In Rus.

9. Dikalov D.V. Comprehensive approach to the construction of a permanently working geological-technological model on the example of the Western-Tugrovsky deposit. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2018, no. 9, pp. 34–40. In Rus.
10. Bozhenyuk N.N., Belkina V.A., Strekalov A.V. Geological model of the vikulovskaya suit deposits, including analysis of a manifold connectivity and the data on horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 30–44. In Rus.
11. Belov K.V., Lisenkov A.B., Ponomarev A.D., Gorbatenko N.S. Study of fluid filtration in a porous medium using physical and numerical modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 64–74. In Rus.
12. Viktorin V.D. *Vliyaniye osobennostey karbonatnykh kolektorov na effektivnost razrabotki neftyanykh zalezhey* [Influence of carbonate reservoir parameters on oil reserves development efficiency]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 150 p.
13. Erlager R. *Gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin* [Hydrodynamic methods of studying wells]. Moscow, Izhevsk, Computer Studying Institute Publ., 2007. 512 p.
14. Martyshev D.A., Slushkina A.Yu. Assessment of informative value in determination of reservoir filtration parameters based on interpretation of pressure stabilization curves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 26–32. In Rus.
15. Klinkenberg L.J. The permeability of porous media to liquids and gases. *Am. Petroleum Inst. Drilling and Production Practice*, 1941, pp. 200–213.
16. Takougang E.M.T., Bouzidi Y., Ali M.Y. Characterization of small faults and fractures in a carbonate reservoir using waveform inversion, reverse time migration, and seismic attributes. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, vol. 161, pp. 116–123.
17. Thararoop P., Karpyn Z., Gitman A., Ertekin T. Integration of seismic attributes and production data for infill drilling strategies – a virtual intelligence approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2008, vol. 63, Iss. 1–4, pp. 43–52.
18. Iturrarán-Viveros U., Parra J.O. Artificial neural networks applied to estimate permeability, porosity and intrinsic attenuation using seismic attributes and well-log data. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 107, pp. 45–54.
19. Yang P., Sun Z., Liang X., Li H., Dan G. Seismic strategy for predicting highly profitable wells in the fractured-vuggy carbonate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, vol. 40, Iss. 4, pp. 537–541.
20. Boadu F.K. Predicting the transport properties of fractured rocks from seismic information: numerical experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, vol. 44, Iss. 2–3, pp. 103–113.
21. Raeesi M., Moradzadeh A., Ardejani F. D., Rahimi M. Classification and identification of hydrocarbon reservoir lithofacies and their heterogeneity using seismic attributes, logs data and artificial neural networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 82–83, pp. 151–165.
22. Zhen Yin, Tao Feng, Colin MacBeth. Fast assimilation of frequently acquired 4D seismic data for reservoir history matching. *Computers & Geosciences Volume*, 2019, Iss. 128, pp. 30–40.
23. *Reglament sostavleniya proyektnykh tekhnologicheskikh dokumentov na razrabotku neftyanykh i gazonefitynykh mestorozhdeniy: RD 153-39-007-96* [Regulations for drafting of project technological documents for oil and gas fields development: WD]. Available at: <http://www.consultant.ru> (accessed 11 November 2019).
24. Olenchikov D.M. Interactive step-by-step calculation as the basis of automation methods for adapting hydrodynamic models with a large number of wells. *Scientific and Technical Bulletin of OJSC OI «ROSNEFT»*, 2007, no. 2, pp. 38–40. In Rus.
25. Bozhenyuk N.N., Strekalov A.V. Some methods of simulation model history-matching. *Petroleum Engineering*, 2016, no. 2, pp. 42–49. In Rus.
26. Krasovsky A.V., Svetskiy S.Yu., Shandrygolov Z.N., Zimin E.S. Geology and field data processing using neural networks for production history matching. *Drilling and oil*, 2014, no. 10, pp. 44–46. In Rus.
27. Osho Ihamah. A multiobjective dominance and decomposition algorithm for reservoir model history matching. *Petroleum*, 2019, vol. 5, Iss. 4, pp. 352–366.
28. Akmal Aulia, Daein Jeong, Ismail Mohd Saaid, Dina Kania, Noaman A. El-Khatib. A Random Forests-based sensitivity analysis framework for assisted history matching. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 181, article 106237.
29. Katterbauer K., Arango S., Sun Sh., Hoteit I. Multi-data reservoir history matching for enhanced reservoir forecasting and uncertainty quantification. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 128, pp. 160–176.
30. Hui Zhao, Ying Li, Shuyue Cui, Genhua Shang, Huazhou Andy Li. History matching and production optimization of water flooding based on a data-driven interwell numerical simulation model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 3, pp. 48–66.
31. Vink J.C., Gao G., Chen C. Bayesian style history matching: another way to under-estimate forecast uncertainty. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas, USA, 2015. pp. 5803–5821.
32. Ermekov R.I., Korovin M.O., Merkulov V.P., Chernova O.S. Construction of an anisotropic hydrodynamic model and study of the influence of permeability anisotropy on the example of field block modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 86–93. In Rus.

Received: 23 September 2020.

#### Information about the authors

**Nikita D. Kozyrev**, graduate student, Perm National Research Polytechnic University; engineer of the 1 category, branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

**Alexandr A. Kochnev**, graduate student, Perm National Research Polytechnic University; engineer of the 2 category, branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

**Alexandr G. Mengaliev**, engineer of the 2 category, branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

**Ivan S. Putilov**, Dr. Sc., professor, Perm National Research Polytechnic University; deputy director of the branch for scientific research in geology, branch of LLC «LUKOIL-Engineering» «PermNIPIneft» in Perm.

**Sergey N. Krivoshechekov**, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 622.276.58

## УТИЛИЗАЦИЯ БАЛЛАСТНОЙ ПОПУТНО ДОБЫВАЕМОЙ ВОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СКВАЖИННОЙ СЕПАРАЦИИ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Лекомцев Александр Викторович<sup>1</sup>,  
alex.lekomtsev@mail.ru

Дерендяев Константин Алексеевич<sup>1</sup>,  
k.derenadyaev@yandex.ru

Бурцев Андрей Сергеевич<sup>1</sup>,  
andrey.burtsev97@gmail.com

Степаненко Иван Борисович<sup>1</sup>,  
stepanenko2403@gmail.com

Жигарев Даниил Борисович<sup>1</sup>,  
zhigarev.daniil@mail.ru

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

**Актуальность.** Одной из основных проблем нефтедобывающей промышленности в сфере добычи нефти и газа является добыча больших объемов балластной воды. Средняя кратность перекачиваемой воды к нефти может составлять 4:1 и более. На территории Пермского края данная проблема является особенно актуальной, так как многие месторождения находятся на 3 и 4 стадиях разработки и требуют внедрения новых технологий для более рентабельной добычи нефти. В связи с перекачкой больших объемов жидкости происходит более быстрый процесс износа оборудования и появляются дополнительные затраты электроэнергии для его использования. В связи с этим внедрение технологии скважинной и кустовой сепарации водонефтяной эмульсии является одним из наиболее эффективных способов решения производственной задачи путем децентрализации системы сбора и подготовки скважинной продукции путем применения технологии кустовой сепарации водонефтяной эмульсии при децентрализованной системе подготовки.

**Цель:** уменьшение затрат на сбор и подготовку скважинной продукции путем применения технологии кустовой сепарации водонефтяной эмульсии при децентрализованной системе подготовки.

**Объект:** кусты скважин со средней обводненностью 65–70 % и более.

**Методы:** обзор научной литературы, моделирование процесса кустовой сепарации в Aspen HYSYS; лабораторные исследования на созданном макете, имитирующем скважину.

**Результаты.** Представлена технология кустового разделения продукции скважин на нефть и воду с дальнейшим использованием попутно добываемой воды в системе поддержания пластового давления. Представлена принципиальная технологическая схема установки. Проведены лабораторные испытания, выявлены оптимальные параметры её работы. Приведена технико-экономическая оценка реализации технологии и обоснованные технические решения.

### Ключевые слова:

Подготовка скважинной продукции, скважинная сепарация, балластная вода, водонефтяная эмульсия, сброс воды.

### Введение

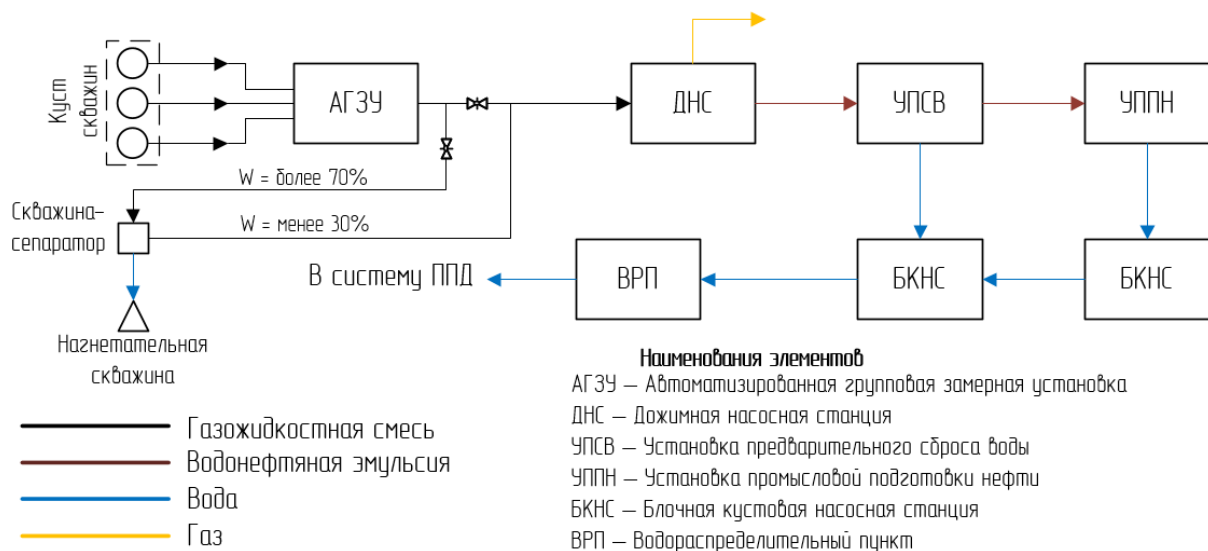
Высокие давления в трубопроводах системы сбора и транспортировки скважинной жидкости приводят к увеличению энергопотребления глубинного и наземного насосного оборудования и повышают риск выхода его из строя. Это обусловлено образованием высоковязкой обратной нефтяной эмульсии и отложением твердых органических и неорганических солей в трубопроводах. Помимо этого, большое количество скважин добывает высокообводненную продукцию, что существенно увеличивает эксплуатационные затраты на сбор, транспорт и подготовку сырой нефти, а также на возврат попутно добываемой воды до нагнетательных скважин [1, 2]. На 40 % месторождений, территориально расположенных в Пермском крае, существуют обозначенные проблемы. В этой связи актуальным становится вопрос подготовки скважинной продукции на кустовой площадке с целью снижения давления в трубопроводе, вероятности образования пробок, уменьшения загрузки промысловых объектов подготовки, снижения затрат на транспорт и

разделение водонефтяной эмульсии (ВНЭ), а также на перекачку воды в системах сбора продукции скважин и поддержания пластового давления (ППД).

В ходе анализа отечественной и зарубежной литературы и патентной документации установлено, что технология кустовой сепарации хорошо изучена и используется с применением различных методов разделения водонефтяной эмульсии, но при этом требует доработок и устранения имеющихся недостатков [3–13].

На основании анализа научной литературы выделены технические решения, позволяющие обеспечивать сепарацию попутно добываемой воды на кустовых площадках скважин [14–20]. В качестве водоотделителя планируется использовать скважину в консервации.

В статье предлагается применение технологии кустовой сепарации с целью снижения операционных расходов на сбор, транспортировку и подготовку нефти, газа и воды. На рис. 1 представлена принципиальная схема сбора и подготовки скважинной продукции с применением технологии кустовой сепарации.



**Рис. 1.** Принципиальная схема сбора и подготовки с реализацией кустовой сепарации

**Fig. 1.** Scheme of collection and preparation with implementation of cluster separation

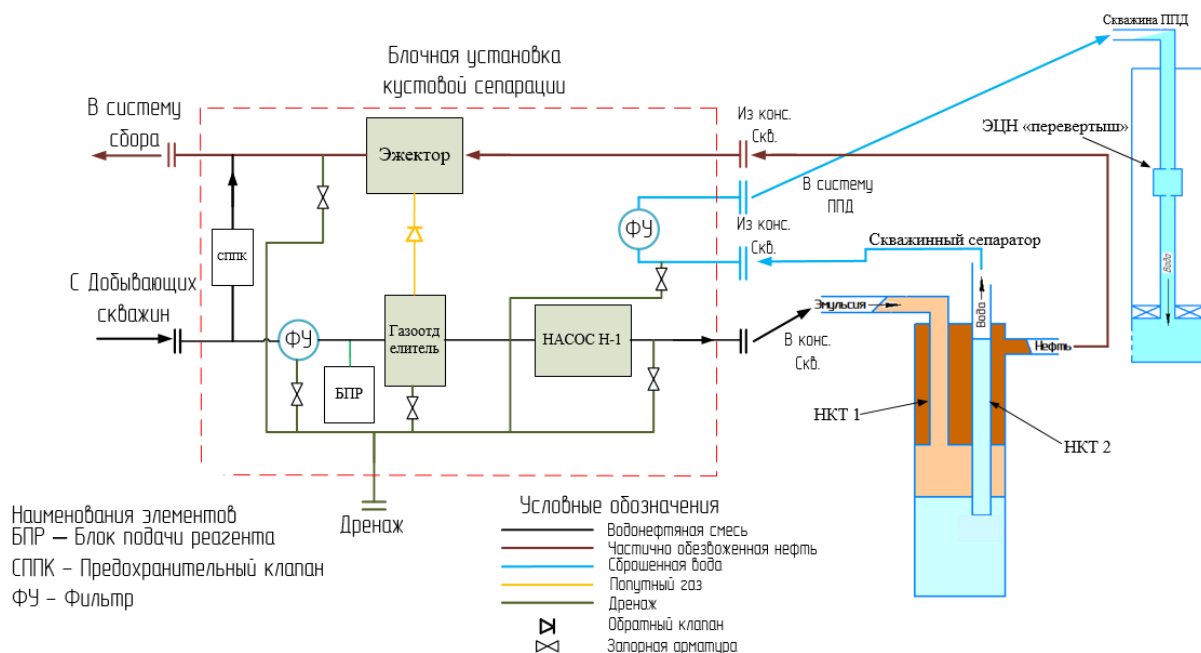
С кустовой площадки высокообводненная эмульсия (с содержанием воды более 70 %) проходит через измерительные устройства и далее поступает в скважину-сепаратор, где происходит процесс сброса свободной попутной воды. Жидкость с существенно меньшей обводненностью (менее 30 %) поступает в общую систему сбора. Отделенная вода направляется в нагнетательную скважину. По технологии имеется возможность направить всю добытую жидкость в общую систему сбора для осуществления технического обслуживания скважины-сепаратора.

#### Технология процесса

Технология децентрализованной подготовки скважинной продукции позволяет обеспечить предварительный

сброс некоторого количества попутно добываемой воды, тем самым существенно снизить износ используемого оборудования, эксплуатационные затраты, а также линейные давления в скважинах. Для достижения большей эффективности технологии рекомендуется использовать ее для кустов скважин с обводненностью 75 % и более.

Данная разработка дает возможность разделять продукцию добывающих скважин. При этом отделенная вода направляется для нужд ППД, а частично обезвоженная нефть возвращается обратно в технологический процесс. В качестве сепаратора используется скважина в консервации. Принципиальная технологическая схема скважинной сепарации продукции представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Принципиальная технологическая схема скважинной сепарации

**Fig. 2.** Principal technological scheme of borehole separation



Установка кустовой сепарации работает следующим образом. Скважинная продукция со сборного коллектора или с автоматизированной групповой замерной установки (АГЗУ) по трубопроводу через газоотделитель направляется на вход прием насоса Н-1, который нагнетает давление в трубопроводе и транспортирует ВНЭ в скважину-сепаратор. Частично обезвоженная нефть, скопившаяся в верхней части скважины, из затрубного пространства самотеком поступает либо на вход эжектора, либо через байпас в систему сбора. Отделившаяся вода под давлением, создаваемым насосом Н-1, по НКТ направляется на фильтр тонкой очистки для снижения содержания нефтепродуктов и твердых примесей. Далее по трубопроводу отфильтрованная вода направляется в нагнетательную скважину системы ППД [21].

В связи с высоким значением газового фактора добывающих скважин возникает риск вредного влияния на работу скважинного сепаратора. При средней обводненности 90 % наблюдается повышенное удельное содержание свободного газа, которое может достигать 26 % по объему. Основными осложняющими факторами являются:

- а) скопление газа в виде газовой шапки в первой лифтовой трубе;

- б) поступление газа на прием насоса;
- в) интенсивное перемешивание эмульсии.

Для отделения газа и улучшения процесса разделения в скважине-сепараторе перед входом установлен газоотделитель. Выделившийся попутный газ поступает на прием эжектора как пассивная фаза, в которой частично обезвоженная эмульсия (активная фаза) за счет конструктивных особенностей работы всасывает низконапорный поток, и в результате их смешивания образуется газожидкостная смесь.

Отделившаяся в скважине-сепараторе вода должна соответствовать стандартам предприятия (СТП) и быть не хуже показателей качества вод по содержанию нефтепродуктов и твердых взвешенных частиц (ТВЧ) для закачки в пласт. Содержание примесей будет регулироваться расходом электроцентробежного насоса (ЭЦН), для определения оптимального расхода требуется проводить дополнительные расчеты.

#### Выбор оптимального куста скважин

На основании проведенного анализа из 209 потенциальных объектов на 20 месторождениях, подходящих по условиям внедрения технологии, выбран куст со скважинами 1–3. Основные технологические параметры работы скважин приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Технологические параметры добывающих скважин

**Table 1.** Technological parameters of producing wells

Скв. Well	Пласт Reservoir	$P_{\text{лин}},$ МПа $P_{\text{line}},$ МПа	$Q_{\text{ж}},$ м <sup>3</sup> /сут $Q_{\text{liq}},$ m <sup>3</sup> /d	% воды % of water	$Y$ воды, г/см <sup>3</sup> $Y$ of water, g/cm <sup>3</sup>	$Y$ нефти, г/см <sup>3</sup> $Y$ of oil, g/cm <sup>3</sup>	$Y$ жидкости, г/см <sup>3</sup> $Y$ of liquid, g/cm <sup>3</sup>	$Q_{\text{н}},$ т/сут $Q_{\text{oil}},$ t/d	Газовый фактор, м <sup>3</sup> /т Gas factor, m <sup>3</sup> /t
1	Тл-Бб	1,60	31,2	93,0	1,075	0,822	1,057	1,8	159
2	Тл-Бб	1,60	96,4	96,0	1,053	0,824	1,044	3,2	159
3	Тл-Бб	1,60	37,5	97,4	1,062	0,822	1,056	0,8	159

**Таблица 2.** Технологические показатели нагнетательных скважин

**Table 2.** Technological parameters of injection wells

Скв. Well	Пласт Reservoir	Тип воды Water type	$P_{\text{уст}}$	Фактический режим Actual mode	Намечаемый режим Proposed mode		
				$Q_{\text{потенц}},$ м <sup>3</sup> /сут $Q_{\text{pot}},$ m <sup>3</sup> /d	$Q,$ м <sup>3</sup> /сут	Дни работы Day of work	Закачка за месяц Monthly injection
4	Бш-Срп+Тл-Бб	подтоварная	12	850	450	30	13500
5	D3f		12	1 700		30	13500

Как видно из табл. 1, продукция скважин имеет высокую обводненность (более 90 %). Такое высокое значение обеспечит эффективную сепарацию в стволе скважин. Дебит скважины по жидкости 165,1 м<sup>3</sup>/сут, из них 159,3 м<sup>3</sup>/сут воды, средняя обводненность – 96,5 %. Имеется значительный потенциал по закачке, что подтверждает возможность реализации технологии (табл. 2).

Скважина-сепаратор имеет следующие размеры: диаметр эксплуатационной колонны – 146 мм с толщиной стенки 8мм, в нее спускается две параллельных колонны НКТ с внешним диаметром 48 мм.

#### Численный эксперимент процесса скважинной сепарации

Проведено моделирование процесса кустовой сепарации гравитационным методом с использованием

скважины в консервации с помощью программного продукта Aspen HYSYS [22]. В рамках задачи требовалось оценить расход воды через ЭЦН, при котором качество воды удовлетворяло СТП (количество нефтепродуктов до 28 мг/л, количество взвешенных веществ до 20 мг/л).

Результаты моделирования представлены в виде графика (рис. 3).

В соответствии с графиком и результатами моделирования в скважину-сепаратор необходимо установить насос с расходом в диапазоне до 120 м<sup>3</sup>/сут и вести эксплуатацию с расходом до 119 м<sup>3</sup>/сут, чтобы качество воды соответствовало требуемым показателям воды для закачки в пласт.

В скважинном сепараторе выделяется так называемый полезный объем между точкой выхода эмуль-

сии из НКТ-1 и входа в НКТ-2 (участок перемешивания эмульсии). Качество воды на входе в НКТ-2 должно быть выше стандарта предприятия (СТП) по содержанию нефтепродуктов и ТВЧ для закачки в пласт. В условиях гравитационного отстоя качество продукции зависит от времени, за которое из водной среды нефтяная фаза успеет отделиться и всплыть. Скорость всплытия должна быть больше или равна скорости опускания слоя отделившейся воды в скважине, вследствие откачки насосом. В процессе всплытия капли нефти коагулируют, образуя при этом более крупные капли, увеличивают линейный размер, что улучшает условия по разделению эмульсии согласно закону Стокса:

$$\vartheta_H = \frac{d_H^2 \cdot (\rho_B - \rho_H) \cdot g}{18 \cdot \mu_B},$$

где  $\vartheta_H$  – скорость всплытия капель нефти в воде, м/с;  $\rho_B$  – плотность пластовой воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_H$  – плотность нефти, кг/м<sup>3</sup>;  $d_H$  – диаметр капель воды, м;  $\mu_B$  – динамическая вязкость пластовой воды, Па·с.

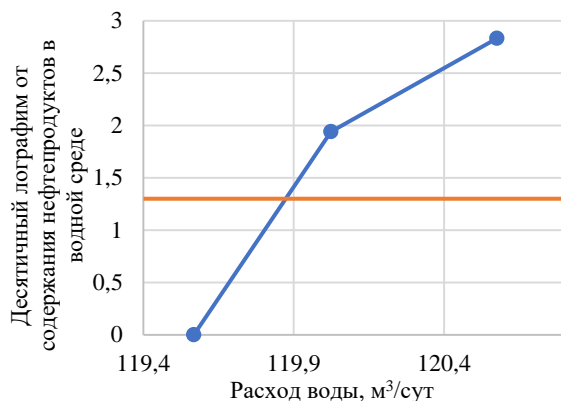


Рис. 3. Зависимость содержания нефтепродуктов от расхода воды

Fig. 3. Dependence of oil content on water consumption

Скорость всплытия в соответствии с вышеописанным процессом увеличивается по мере подъема капли и ее укрупнения.

По данным лабораторных исследований для заданной эмульсии устанавливается зависимость содержания нефтепродуктов в воде от времени гравитационного отстоя (рис. 4).

Зная планируемую глубину спуска насоса и расход воды, определяется время сепарации  $\Delta t^*$ :

$$\Delta t^* = \frac{H_{\text{нас}} - H_{\text{вст}} - \Delta H}{\vartheta_{\text{в скв}}},$$

где  $H_{\text{нас}}$  – глубина насоса, м;  $H_{\text{вст}}$  – глубина трубной вставки, м;  $\Delta H$  – запас глубины, м;  $\vartheta_{\text{в скв}}$  – скорость оседания капель воды, м/с.

Скорость оседания капель воды находится как частное между расходом воды и площадью поперечного сечения, где происходит разделение. Параметр запас глубины вводится для полной уверенности, что вода достигла необходимого качества для использования в системе ППД. При этом полученное значение

должно быть больше или равно некоему критическому значению времени, которое может быть определено в лабораторных исследованиях:

$$\Delta t^* \geq \Delta t_{\text{кр}},$$

где  $\Delta t_{\text{кр}}$  – критическое значение времени процесса сепарации, при котором выполняются требования СТП по содержанию нефтепродуктов.

Скважина-сепаратор имеет следующие размеры: диаметр эксплуатационной колонны – 146 мм с толщиной стенки 7,7 мм, в нее спускается две параллельных колонны НКТ с внешним диаметром 48 мм. Исходные данные для проектирования и моделирования технологии приведены в табл. 3.

Таблица 3. Исходные данные и результаты расчета процесса сепарации

Table 3. Initial data and calculation results of separation

Наименование/Name	Значение/Value
Расход воды, м³/сут; ( $Q_a$ )/Water flow rate, m³/d	120
Скорость опускания слоя отделившейся воды, которая соответствует заданному расходу, м/с; ( $\vartheta_{\text{в скв}}$ ) Rate of lowering the separated water layer, which corresponds to the specified flow rate, m/s	0,117
Глубина спуска насоса, м; $H_{\text{нас}}$ /Pump setting depth, m	1500
Глубина спуска трубной вставки, м; $H_{\text{вст}}$ Pipe insert descent depth, m	100
Запас глубины, м; $\Delta H$ /Depth margin, m	50
Время процесса сепарации по рассматриваемому объекту, мин Separation time for the object under consideration, min	192,3

#### Стандовые испытания

Для расчета критического времени процесса сепарации разработан лабораторный стенд, имитирующий скважину, – полая труба длиной 1600 мм с внутренним диаметром 50 мм, с расположенными на ней шаровыми кранами для отбора проб с различных уровней. За счет гравитационного разделения эмульсии определялось содержание нефтепродуктов на различных уровнях и скорость их всплытия в воде при различных интервалах времени отстоя эмульсии.

По результатам лабораторных исследований построен график зависимости содержания нефтепродуктов от времени гравитационного отстоя эмульсии.

Из рис. 4 установлено критическое время гравитационного отстоя, при котором качество воды отвечает требованиям СТП. Для крана № 1 (соответствует нижней части стенда) время отстоя составляет 10 минут, для крана № 3 (соответствует средней части стенда) – 60 минут. Из расчета время процесса сепарации при заданных исходных данных составляет 192,3 минуты, что значительно больше критического значения времени  $\Delta t_{\text{кр}}=60$  минут (для крана № 3), и имеется значительный потенциал по расходу сброшенной воды из скважины. Отбор проб воды в средней и нижней части стенда обусловлен тем, что в указанных областях не накапливается нефтяная шапка и имеется свободный объем для всплытия дисперсной фазы (нефтепродуктов) в дисперсионной среде (воде).

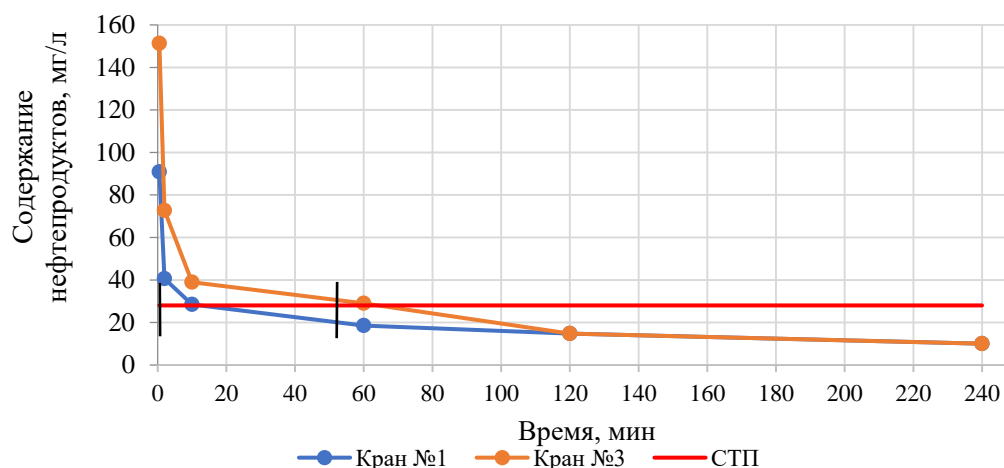


Рис. 4. Зависимость содержания нефтепродуктов от времени отстоя эмульсии

Fig. 4. Dependence of petroleum products content on emulsion settling time

#### Оценка экономической эффективности

Для расчета операционных затрат на транспортировку и подготовку добываемой жидкости определялись удельные значения затрачиваемых средств на 1 м<sup>3</sup> по каждой статье затрат по следующей формуле:

$$\delta = \frac{N \cdot S}{Q} \text{ руб/м}^3,$$

где N – количество затрачиваемой энергии или агента для подготовки или перекачки; S – стоимость энергии или агента; Q – количество жидкости, участвующей в процессе.

В общем случае затраты состоят из затрат на электроэнергию для перекачки (потребляемая насосами на дожимной насосной станции (ДНС), насосами на установке по подготовке и перекачке нефти (УППН) для внутренней перекачки жидкости), электроэнергию на нагрев газожидкостной смеси на печах и теплообменниках, электроэнергию, потребляемую высоконапорными насосами на блочной кустовой насосной станции (БКНС) для ППД, а также расходы на деэмульгатор.

В табл. 4 представлены значения удельных затрат электроэнергии и агента предприятием за 2019 г.

Используя рассчитанные удельные расходы для 1 м<sup>3</sup> жидкости, определим количество средств, которые предприятие будет экономить после реализации кустовой сепарации в год.

До реализации кустовой сепарации затраты на транспортировку и подготовку составляли:

$$S_{\text{СИП до}} = Q_{\text{ж}} \cdot \delta \cdot 365,$$

где  $Q_{\text{ж}}$  – общее количество добываемой жидкости;  $\delta$  – удельные затраты на транспортировку и подготовку.

Затраты энергии насосами на КНС для обратной транспортировки воды и создания давления для ППД составляли:

$$S_{\text{ППД до}} = Q_{\text{зак}} \cdot \gamma_{\text{до}} \cdot 365.$$

Общие затраты:

$$S_{\text{до}} = S_{\text{СИП до}} + S_{\text{ППД до}} \text{ руб/год.}$$

Таблица 4. Количество затрачиваемой энергии (за год)

Table 4. Amount of energy consumed (per year)

Пункт затрат/Cost point		Удельные затраты, р./м <sup>3</sup> Unit costs, rub/ m <sup>3</sup>
для транспортировки до УППН for transportation to the crude oil treating plant (COTP)		17,68
для внутренней перекачки на УППН for internal pumping to the COTP		3,84
для нагрева газожидкостной смеси (ГЖС) на УППН – печи for heating the gas-liquid mixture on the COTP – furnace		1,53
для нагрева ГЖС на УППН – теплообменники for heating a gas-liquid mixture on the COTP – heat exchangers		2,30
Энергия, для системы ППД Energy, for maintain formation pressure (MFP) system	БКНС Water injection station (WIS)	45,29
	при кустовой сепарации for cluster separation	34,85
Количество добавляемого деэмульгатора Number of demulsifiers to add		7,24
Общие затраты на сбор и подготовку добываемой жидкости Total costs for collecting and preparing the extracted liquid		32,59

При суточной добыче жидкости  $Q_{\text{ж}}$  и добыче воды  $Q_{\text{в}}$  на УППН будет транспортироваться:

$$Q_{\text{трансп}} = Q_{\text{ж}} - Q_{\text{в}} \frac{\text{м}^3}{\text{сут.}}$$

После реализации кустовой сепарации затраты на транспортировку и подготовку будут составлять:

$$S_{\text{СИП после}} = Q_{\text{трансп}} \cdot \delta \cdot 365.$$

Затраты энергии для ППД после реализации кустовой сепарации будут разделяться на часть, затрачиваемую на КНС ( $W_{\text{КНС}}$ ), и на часть, потребляемую насосом ( $W_{\text{КС}}$ ), установленным в скважине для ППД. Общие затраты на ППД после реализации будут составлять:

$$S_{\text{ППД после}} = (W_{\text{КС}} \cdot Q_{\text{в}} \cdot \gamma_{\text{после}} + W_{\text{КНС}} \cdot Q_{\text{в}} \cdot \gamma_{\text{до}}) \cdot 365.$$

Общие затраты после реализации составят:

$$S_{\text{после}} = S_{\text{СИП после}} + S_{\text{ППД после}}$$

Общая экономия составит:

$$S_{\text{экон}} = S_{\text{до}} - S_{\text{после}}$$

Все численные значения представлены в табл. 5.

**Таблица 5.** Результаты расчета экономии средств, тыс. р./год

**Table 5.** Results of calculation of savings, thousands rub/year

Наименование затрат/Cost name	Величина затрат/Cost amount
До реализации кустовой сепарации Before implementing cluster separation	
Затраты на сбор и подготовку ГЖС Costs for collecting and preparing a gas-liquid mixture	1777,2
Затраты на ППД /Costs for MFP	2363,5
Общие затраты/Total input	4140,7
После реализации кустовой сепарации After implementation of the group separation	
Затраты на сбор и подготовку ГЖС Costs for collecting and preparing a gas-liquid mixture	586,6
Затраты на ППД (в том числе на устьевое оборудование технологии кустовой сепарации) Costs for MFP (including wellhead equipment for cluster separation technology)	1982,2
Общие затраты/Total input	2568,8
Общая экономия средств за год Total cost savings for the year	1571,9

Величина разовых затрат для реализации проекта, а именно на изготовление блочной установки кустовой сепарации и монтажа трубопроводной обвязки, составит 3 млн руб. С учётом экономии средств за год рассчитаем срок окупаемости без учета ремонтных работ высоконапорного трубопровода и восстановления работоспособности 1 раз в 10 лет:

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Султанаева А.Р. Обезвоживание нефти с последующим применением воды для закачки в пласт // Проблемы науки. – 2018. – № 4. – С. 56–59.
2. Кусов Г.В., Савенок О.В. Реконструкция Южно-Ягунского нефтяного месторождения // Булатовские чтения. – 2017. – № 2. – С. 133–141.
3. Хафизов А.Р., Галиуллин Р.Ш., Фаткуллин А.А. О внедрении новых технологий и концепции измерений в системах сбора и подготовки продукции нефтяных скважин // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 6. – С. 295–306.
4. Обоснование возможности применения технологии кустового сброса воды на Ново-Киевском месторождении / Г.К. Борисов, В.Ф. Шаякберов, М.Х. Газимов, К.Б. Борисов, А.В. Мостобоев // Нефтепромысловое дело. – 2011. – № 12. – С. 46–51.
5. Иванов В.А., Кудашев С.В. Система сбора продукции высокообводнённых скважин и утилизации пластовой воды // Нефтепромысловое дело. – 2012. – № 2. – С. 44–48.
6. Abdel-Fattah A.I. Acoustic downhole oil/water/fines separation (ADOWFs) // SPE Production and Operations. – 2018. – V. 33. – P. 829–836.
7. A novel oil-water separator design and its performance prediction / Q. Zeng, Z. Wang, X. Wang, Y. Zhao, X. Guo // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – V. 145. – P. 83–94.
8. Zhao C., Sun H., Li Z. Structural optimization of downhole oil-water separator // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 148. – P. 115–126.

$$CO = \frac{CAPEX}{S_{\text{экон}}} = \frac{3}{1572} = 1,91 \text{ лет,}$$

где CO – срок окупаемости; CAPEX – разовые затраты для реализации проекта.

Таким образом, срок окупаемости проекта составляет менее 2 лет.

#### Заключение

Представлены результаты аналитического расчета процесса сепарации, результаты стендовых испытаний, а также результаты моделирования в программном продукте Aspen Hysys. По полученным результатам определены параметры работы установки внутрискважинной сепарации, при которых достигаются все требования по показателям воды для закачки в пласт. Дополнительно были проведены лабораторные исследования на содержание в воде ТВЧ, по результатам которых выявлена необходимость в фильтрационной установке.

Представленная технология позволяет достичь сокращения затрат на транспорт и подготовку объема балласта (подтоварной воды), то есть сократить расходы реагентов для обеспечения процесса (деэмульгатора, ингибитора коррозии).

Благодаря снижению количества перекачиваемой жидкости уменьшается нагрузка на ДНС и УППН и повышается качество подготовки продукта. Предложенная технология позволяет децентрализовать подготовку воды, тем самым снизив ее затраты на транспортировку от КНС до нагнетательной скважины, а также позволяет уменьшить давления в системе сбора за счет снижения вязкости водонефтяной эмульсии и повышения температуры потока.

*Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование».*

9. Progress and prospect of downhole cyclone oil-water separation with single-well injection-production technology / H. Liu, Y. Gao, X. Pei, G. Zheng, L. Zheng // Shiyao Xuebao/Acta Petrolei Sinica. – 2018. – V. 39. – P. 463–471.
10. Downhole oil-water separation moves into high gear / B.R. Peachey, S.C. Solanki, T.A. Zahacy, K. Piers // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 1998. – V. 37. – P. 31–41.
11. Application of downhole oil/water separation systems in the alliance field / C.M. Matthews, R. Chachula, B.R. Peachey, S.C. Solanki // Proceedings of the 1996 3rd International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. P. 2 (of 2). – New Orleans, 1996. – P. 453–462.
12. Study on the oil/water separation performance of a super-hydrophobic copper mesh under downhole conditions / Y. Lu, Z. Li, G. Hailu, D. Xu, H. Wu, W. Kang // Journal of industrial and engineering chemistry. – 2019. – V. 72. – P. 310–318.
13. Bowers B.E., Brownlee R.F., Schrenkel P.J. Development of a downhole oil/water separation and reinjection system for offshore application // SPE Production and Facilities. – 2000. – V. 15. – P. 115–122.
14. Шаякберов В.Ф. Скважинная установка сброса воды для кустов скважин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2009. – № 3. – С. 15–17.
15. Установка для внутрискважинного разделения нефти от воды: пат. Рос. Федерация, № 25319776, заявл. 20.11.2012; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 30.

16. Установка для внутрискважинной сепарации водогазонефтяной смеси от воды: пат. Рос. Федерация, № 2483211, заявл. 05.07.2012; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 15.
17. Устройство для добычи нефти с внутрискважинной сепарацией: пат. Рос. Федерация, № 2575856, заявл. 19.03.2014; опубл. 20.02.2016. Бюл. № 5.
18. Сепарационная установка: пат. Рос. Федерация, № 2252312, заявл. 18.04.2003; опубл. 20.05.2005. Бюл. № 14.
19. Способ кустового сброса и утилизации попутно добываемой воды: пат. Рос. Федерация, № 2588234, заявл. 29.04.2015; опубл. 27.06.2016. Бюл. № 18.
20. Комплексная кустовая установка обезвоживания нефти, очистки и утилизации попутно добываемой пластовой воды: пат. Рос. Федерация, № 2411055, заявл. 18.08.2009; опубл. 10.02.2011. Бюл. № 4.
21. Голубев И.А. Пути и решения очистки промышленных вод для системы поддержания пластового давления // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 3. – С. 87–96.
22. Силичев М.А., Жигарев Д.Б. Моделирование процесса кустовой сепарации скважинной продукции // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2019. – № 1. – С. 200–202.

Поступила 23.09.2020 г.

#### Информация об авторах

**Лекомцев А.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Дерендяев К.А.**, бакалавр Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Бурцев А.С.**, бакалавр Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Степаненко И.Б.**, бакалавр Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Жигарев Д.Б.**, бакалавр Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276.58

## UTILIZATION OF BALLAST WATER PRODUCED ALONG THE WAY USING THE TECHNOLOGY OF WELL SEPARATION OF OIL-WATER EMULSIONS

Alexander V. Lekomtsev<sup>1</sup>,  
alex.lekomtsev@mail.ru

Konstantin A. Derendyaev<sup>1</sup>,  
k.derendyaev@yandex.ru

Andrey S. Burtsev<sup>1</sup>,  
andrey.burtsev97@gmail.com

Ivan B. Stepanenko<sup>1</sup>,  
stepanenko2403@gmail.com

Daniel B. Zhigarev<sup>1</sup>,  
zhigarev.daniil@mail.ru

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

**The relevance.** One of the main problems of the oil and gas industry in the field of oil and gas production is the production of large volumes of ballast water. The average multiplicity of pumped water to oil can be 4:1 or more. On the territory of the Perm region, this problem is particularly urgent, since many fields are at the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> stages of development and require the introduction of new technologies for more profitable oil production. Due to the pumping of large volumes of liquid, the equipment is worn faster and additional energy costs for its use appear. In this regard, the introduction of technology for well and cluster separation of oil-water emulsion is one of the most effective ways to solve the production problem, by decentralizing the system for collecting and preparing well products.

**Objects:** well bushes with an average water cut of 65–70 % or more.

**Methods:** simulation of the cluster separation process in Aspen HYSYS; laboratory studies on the created layout that simulates a well.

**Results.** This paper presents the technology of cluster separation of well products for oil and water with further use of simultaneously produced water in the system of reservoir pressure maintenance. The technological scheme of the installation is presented. Laboratory tests were carried out and the optimal parameters of its operation were identified. The technical and economic assessment of the technology implementation and justified technical solutions are given.

### Key words:

Production fluid preparation, downhole segregation, ballast water, water-oil emulsion, water release.

This research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the program of activities of the Perm Scientific and Educational Center «Rational Subsoil Use».

### REFERENCES

1. Sultanayeva A.R. Obezvozhivanie nefiti s posleduyushchim primeneniem vody dlya zakachki v plast [Dewatering of oil with subsequent application of water for injection into the reservoir]. *Problemy nauki*, 2018, no. 4, pp. 56–59.
2. Kusov G.V., Savenok O.V. Reconstruction of the Yuzhno-Yagunskoye oil field. *Readings name of A.I. Bulatov*, 2017, no. 2, pp. 133–141. In Rus.
3. Hafizov A.R., Galiullin R.Sh., Fatkullin A.A. Implementing new technologies and measurement concepts in gathering systems and well production processing. *Oil and Gas Business*, 2011, no. 6, pp. 295–306. In Rus.
4. Borekov G.K., Shayakberov V.F., Gazizov M.Kh., Borisov K.B., Mastobaev A.V. Obosnovanie vozmozhnosti primeneniya tekhnologii kustovogo sbrosa vody na Novo-Kievskom mestorozhdenii [Justification of the possibility of using the technology of cluster water discharge at the Novokievskoe field]. *Neftepromyslovoe delo*, 2011, no. 12, pp. 46–51.
5. Ivanov V.A., Kudashov S.V. Sistema sbora produktov vysokodobudnennykh skvazhin i utilizatsii plastovoy vody [System for collecting products from high-water wells and utilization of reservoir water]. *Neftepromyslovoe delo*, 2012, no. 2, pp. 44–48.
6. Abdel-Fattah A.I. Acoustic downhole oil/water/fines separation (ADOWFs). *SPE Production and Operations*, 2018, vol. 33, pp. 829–836.
7. Zeng Q., Wang Z., Wang X., Zhao Y., Guo X. A novel oil-water separator design and its performance prediction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 145, pp. 83–94.
8. Zhao C., Sun H., Li Z. Structural optimization of downhole oil-water separator. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 148, pp. 115–126.
9. Liu H., Gao Y., Pei X., Zheng G., Zheng L. Progress and prospect of downhole cyclone oil-water separation with single-well injection-production technology. *Shiyou Xuebao/Acta Petrolei Sinica*, 2018, vol. 39, pp. 463–471.
10. Peachey B.R., Solanki S.C., Zahacy T.A., Piers K. Downhole oil-water separation moves into high gear. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1998, vol. 37, pp. 31–41.
11. Matthews C.M., Chachula R., Peachey B.R., Solanki S.C. Application of downhole oil/water separation systems in the alliance field. *Proceedings of the 1996 3<sup>rd</sup> International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. P. 2 (of 2)*. New Orleans, 1996. pp. 453–462.
12. Lu Y., Li Z., Hailu G., Xu D., Wu H., Kang W. Study on the oil/water separation performance of a super-hydrophobic copper mesh under downhole conditions. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 2019, vol. 72, pp. 310–318.
13. Bowers B.E., Brownlee R.F., Schrenkel P.J. Development of a downhole oil/water separation and reinjection system for offshore application. *SPE Production and Facilities*, 2000, vol. 15, pp. 115–122.

14. Shayakberov V.F. Skvazhinnaya ustanovka sbrosa vody dlya kustov skvazhin [Downhole water discharge plant for well bushes]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2009, no. 3, pp. 15–17.
15. Rakhmanov A.R., Ozheredov E.V., Akhmadiev R.N., Latfullin R.R., Dzhafarov M.A. *Ustanovka dlya vnutriskvazhinnoy razdeleniya nefii ot vody* [Installation for downhole separation of oil from water]. Patent RF, no. 25319776, 2014.
16. Ibragimov N.G., Rakhmanov A.R., Taziev M.Z., Ozheredov E.V., Dzhafarov M.A. *Ustanovka dlya vnutriskvazhinnoy separatsii vodogazoneftyanoy smesi ot vody* [Installation for downhole separation of water-gas- oil mixture from water]. Patent RF, no. 2483211, 2013.
17. Galay M.I., Demyanenko N.A., Mulitsa S.I., Tretyakov D.L., Serebrennikov A.V., Manuylo V.S., Tokarev V.V. *Ustroystvo dlya dobychi nefii s vnutriskvazhinnoy separatsiey* [Device for oil production with downhole separation]. Patent RF, no. 2575856, 2016.
18. Ramazanov N.R., Mingulov Sh.G., Gataullin Sh.G., Gepshiteyn F.S., Shayakberov V.F. *Separatsionnaya ustanovka* [Separation unit]. Patent RF, no. 2252312, 2005.
19. Umantsev A.A., Gilaev A.G., Sakhnov R.V., Demenin D.M., Antonov A.A., Shayakberov V.F. *Sposob kustovogo sbrosa i utilizatsii poputno dobyvaemoy vody* [Method of cluster discharge and utilization of simultaneously extracted water]. Patent RF, no. 2588234, 2015.
20. Latypov A.R., Mindeev A.N., Golubev V.F., Golubev M.V., Shaydullin F.D., Kashtanova L.E., Yukov A.Yu., Bedrin V.G. *Kompleksnaya kustovaya ustanovka obezvozhivaniya nefii, ochistki i utilizatsii poputno dobyvaemoy plastovoy vody* [Integrated cluster installation oil dehydration, treatment and disposal of produced formation water]. Patent RF, no. 2411055, 2011.
21. Golubev I.A. Ways and solutions of industrial water treatment for reservoir pressure maintenance system. *Oil and Gas Engineering*, 2013, no. 3, pp. 87–96. In Rus.
22. Silichev M.A., Zhigarev D.B. Modelirovanie protsesssa kustovoy separatsii skvazhinnoy produktsii [Modeling of the process of cluster separation of borehole products]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*, 2019, no. 1, pp. 200–202.

Received: 23 September 2020.

#### Information about the authors

**Alexander V. Lekomtsev**, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Konstantin A. Derendyaev**, student, Perm National Research Polytechnic University.

**Andrey S. Burtsev**, student, Perm National Research Polytechnic University.

**Ivan B. Stepanenko**, student, Perm National Research Polytechnic University.

**Daniel B. Zhigarev**, student, Perm National Research Polytechnic University.



УДК 661.721.422

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА НА ВЫХОД МЕТАНОЛА

Загашвили Юрий Владимирович<sup>1</sup>,  
y.zagashvili@yandex.ru

Кузьмин Алексей Михайлович<sup>2,3,4</sup>,  
kuzmin.lex@gmail.com

<sup>1</sup> ООО «ВТР»,  
Россия, 195297, г. Санкт-Петербург, Ольги Форшд, 15 А, к. 1.

<sup>2</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,  
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, 1/21.

<sup>3</sup> ООО «Генератор синтез-газа»,  
Россия, 195297, г. Санкт-Петербург, ул. Ольги Форш, 15, к. 1, кв. 49.

<sup>4</sup> Российская Академия Естественных Наук,  
190013, г. Санкт-Петербург, ул. Серпуховская, д. 38.

**Актуальность** исследования обусловлена отсутствием научно-обоснованных данных о выходе метанола из сырья в зависимости от типа используемого окислителя (кислород, обогащенный воздух, воздух) и оптимизации состава и параметров водородсодержащего газа по критериям отношения компонентов синтез-газа  $H_2/CO$  и модуля (факториала) водородсодержащего газа  $M$  для оптимального синтеза метанола. Проблема особенно важна для малотоннажных установок по производству метанола в промышленных условиях, работающих на забалластированном азотом водородсодержащем газе.

**Цель:** оценить влияние оптимизации состава водородсодержащего газа на выход метанола.

**Объекты:** малотоннажные установки по производству метанола из водородсодержащего газа, состоящие из комплекса генерации водородсодержащего газа и комплекса каталитического синтеза метанола. Комплекс генерации водородсодержащего газа включает трехкомпонентный газогенератор синтез-газа (природный газ – окислитель – химочищенная вода), в котором осуществляется парциальное окисление природного газа, блок теплообменных аппаратов и блок коррекции состава и параметров водородсодержащего газа для обеспечения отношения компонентов  $H_2/CO=2,2-2,8$  и модуля  $M=2,0-2,3$ . Комплекс каталитического синтеза метанола включает проточный каскад, состоящий из трех последовательно соединенных изотермических реакторов с выводом метанола-сырца после каждого реактора без рециркуляции отходящих и «хвостового» газов.

**Методы:** термодинамические расчеты.

**Результаты.** Подтвержден известный факт повышения удельного выхода метанола в зависимости от концентрации кислорода в окислителе на стадии парциального окисления природного газа; показано, что оптимизация состава водородсодержащего газа, идущего на каталитический синтез метанола, обеспечивает прирост удельного выхода метанола; средний удельный прирост выхода метанола при синтезе на оптимизированном составе при  $M=2,05$  по сравнению с синтезом на неоптимизированном составе газа составляет 8–12 %; прирост удельного выхода метанола сохраняется вне зависимости от принятой в расчетах степени конверсии газа в реакторах каскада комплекса синтеза метанола для всех типов окислителей; выявлена нелинейная зависимость удельного выхода метанола от концентрации кислорода в окислителе, заключающаяся в уменьшении прироста удельного выхода метанола при увеличении концентрации кислорода в окислителе свыше 70 %; выявленная зависимость требует дополнительного изучения и экспериментального подтверждения, она позволяет оптимизировать эксплуатационные затраты на окислитель за счет уменьшения удельных затрат кислорода на выход метанола из сырья.

**Ключевые слова:**

Метанол, синтез-газ, газогенератор, термодинамика, парциальное окисление природного газа.

### Введение

Производство метанола включает стадию получения водородсодержащего газа, содержащего водород, оксиды углерода, пары воды, а также азот, остаточный метан и следовые количества других инертных газов. Термодинамические параметры газа должны обеспечивать эксплуатацию катализаторов синтеза метанола в номинальных режимах, которые для современных медьцинкалюминиевых катализаторов – Великобритания – Katalco-51-9, «Johnson Matthey» (ICI), Германия – C79-7GL «Zud-Chemie» AG, Дания – МК-121 «Haldor Topsoe» – составляют по давлению 5–10 МПа, по температуре 200–280 °С [1–5]. Для оптимального синтеза метанола также необходимо, чтобы модуль (факториал) водородсодержащего газа

$M=(H_2 \cdot CO_2)/(CO+CO_2)$  находился в диапазоне  $M=2,0-2,3$  [2–8], что достигается при отношениях  $H_2/CO=2,2-2,8$  и концентрациях  $CO_2=2-7$  % об.

Объемный состав водородсодержащего газа зависит от способа конверсии исходного углеводородного сырья, в качестве которого преимущественно используют природный газ (ПГ). Известны традиционные способы конверсии природного газа, такие как: паровая каталитическая конверсия природного газа (ПКМ); уголекислотная конверсия; парциальное окисление (ПОМ). Наиболее распространенной промышленной технологией является ПКМ, а генерируемый водородсодержащий газ обладает высокими значениями  $H_2/CO \geq 4,5$  и  $M \geq 2,5$  [2–11]. Применение ПОМ по технологиям фирм Shell, Техасо, Lurgi позволяет полу-

чать водородсодержащий газ с параметрами  $H_2/CO \approx 1,6-1,8$ ,  $M \approx 1,4$  в зависимости от состава ПГ, типа окислителя (кислород, воздух или обогащенный кислородом воздух), степени увлажнения ПГ и от основного параметра режима ПОМ – коэффициента избытка окислителя [8, 12–14].

При крупнотоннажном производстве метанола и использовании в качестве исходного сырья более «жирных» газов (например, ПНГ, содержащих гомологи метана) для увеличения концентрации метана применяют предриформинг; для оптимизации тепловых балансов применяют автотермический риформинг; для оптимизации состава водородсодержащего газа, идущего на синтез метанола, применяют комбинированные технологии [2, 4, 9, 15]. Так, сочетая ПКМ, ПОМ и углекислотную конверсию ПГ, оптимизируют модуль водородсодержащего газа, добиваясь повышения выхода метанола на 5–8 % [2–4].

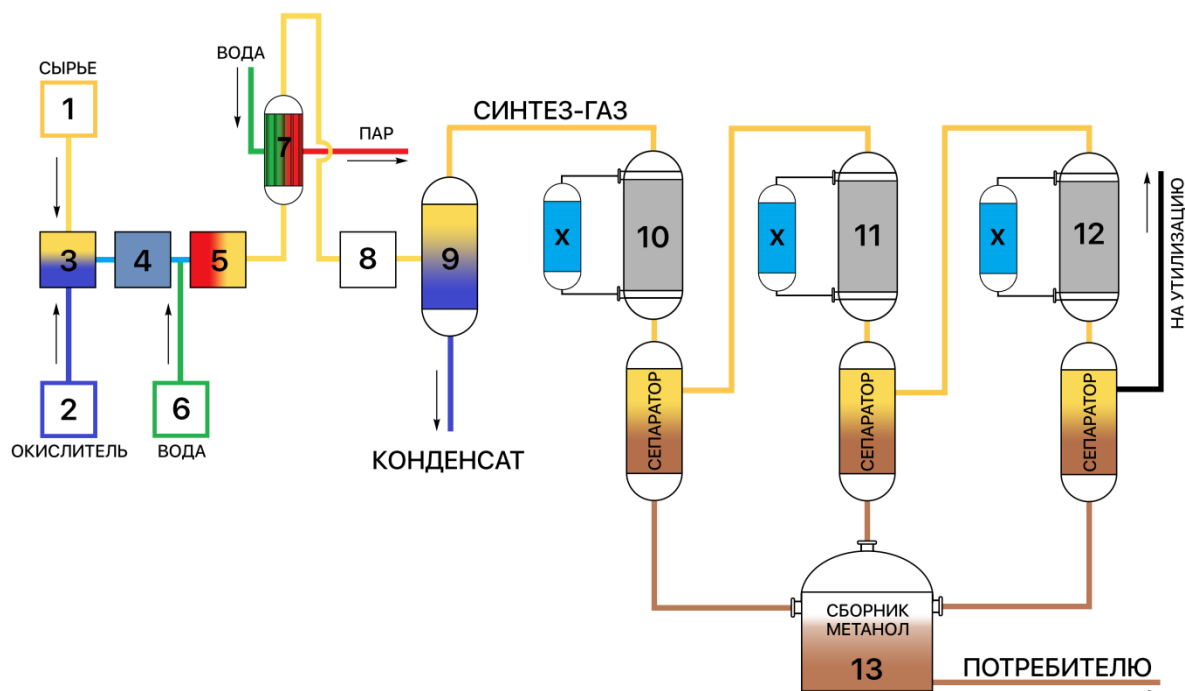
При малотоннажном производстве метанола, в особенности в промышленных условиях при освоении удаленных малодобитных и низконапорных месторождений, актуально применение технологии ПОМ, поскольку газогенераторы синтез-газа (ГСГ) имеют минимальные массогабаритные характеристики и позволяют создавать модульные транспортабельные установки [16–18]. Однако промышленное внедрение технологий малотоннажного производства метанола

на основе ПОМ сдерживается из-за отсутствия научно-обоснованных данных о выходе метанола из сырья в зависимости от используемого типа окислителя. Также отсутствуют данные об удельных капитальных затратах и себестоимости продукции в зависимости от технических решений по оптимизации состава водородсодержащего газа, что в совокупности препятствует получению хотя бы грубой оценки маржинальности бизнеса [17–26].

В настоящей статье приводятся результаты численных экспериментов, позволяющие на примере малотоннажной установки по производству метанола с использованием технологии ПОМ оценить эффективность технических решений, связанных с оптимизацией состава водородсодержащего газа и, соответственно, увеличением степени конверсии водородсодержащего газа в метанол.

#### Описание объекта и программы исследований

Объектом исследования является малотоннажная установка по производству метанола [9, 18, 21–27], состоящая из ГСГ [9, 14], реализующего процесс некаталитического ПОМ и проточного каскада из трех изотермических реакторов синтеза метанола [10]. Также установка содержит блок коррекции состава водородсодержащего газа [9, 28]. Упрощенная блок-схема установки представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Упрощенная блок-схема установки по производству метанола: 1 – узел ввода сырья, 2 – узел ввода окислителя, 3 – смешительная головка ГСГ, 4 – камера сгорания (КС) ГСГ, 5 – испарительная камера (ИК) ГСГ, 6 – узел ввода химочищенной воды в ИК, 7 – котел-утилизатор, 8 – блок коррекции, 9 – сепаратор, 10–12 – реакторы синтеза метанола, 13 – накопитель метанола, X – холодильник

**Fig. 1.** Simplified flow diagram of a methanol production plant: 1 – raw material input unit, 2 – oxidizer input unit, 3 – mixing head of a syngas generator, 4 – combustion chamber (CC) of a syngas generator, 5 – evaporation chamber (EC) of a syngas generator, 6 – chemical water input unit of a syngas generator, 7 – recovery boiler, 8 – correction unit, 9 – separator, 10–12 – methanol synthesis reactors, 13 – methanol storage unit, X – refrigerator

Исходным углеводородным сырьем является ПГ, имеющий следующий состав, об. %:  $\text{CH}_4$  – 97,57,  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 1,0,  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0,37,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,15,  $\text{N}_2$  – 0,84,  $\text{CO}_2$  – 0,07. ПГ смешивают с водяным паром, составляющим 15 % по массе относительно массы сырья, и через узел ввода – 1 подают в смесительную головку ГСГ – 3. В качестве окислителя рассматривались кислород, воздух, обогащенный воздух с концентрацией  $\text{O}_2$  – 35 % об., обогащенный воздух с концентрацией  $\text{O}_2$  – 70 % об. Окислитель через узел ввода – 2 подают в смесительную головку ГСГ. Начальные параметры режима ПОМ: давление подачи компонентов – 6,5 МПа, температура увлажненного сырья – 400 °С, температура кислорода – 170 °С, начальная температура остальных типов окислителей – 250 °С. Значения коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  принимались в соответствии с рекомендациями работ [14, 15, 20, 27, 29, 30], а именно:  $\alpha=0,34$  – для компонентов ПГ – кислород,  $\alpha=0,35$  – для компонентов ПГ – обогащенный воздух ( $\text{O}_2$  – 70 % об.),  $\alpha=0,36$  – для компонентов ПГ – обогащенный воздух ( $\text{O}_2$  – 35 % об.),  $\alpha=0,38$  – для компонентов ПГ – воздух. Конструкция смесительной головки обеспечивает турбулентный режим подачи окислителя и нагретого увлажненного ПГ в КС – 4, в которой протекает процесс некаталитического парциального окисления ПГ при давлении 6,0 МПа. Продукты ПОМ из КС поступают в ИК – 5, где охлаждаются путем впрыска химочищенной воды через узел ввода – 6. Температура газового потока на выходе ИК (выходе ГСГ) является регулируемой, в расчетах ее значение принималось 900 °С. Газ с выхода ИК используют для нагрева сырья и окислителя, а также выработки водяного пара в котле-утилизаторе – 7, откуда водородсодержащий газ поступает в блок коррекции – 8 для коррекции концентраций  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  и оптимизации модуля М. Газ с выхода блока коррекции охлаждают, после чего в сепараторе – 9 отделяют водяной конденсат. Отходящий из 9 газовый поток нагревают до 210 °С и подают в блок синтеза метанола под давлением 5,0 МПа. В реакторах синтеза метанола применяют катализатор C79-7GL. Газовые потоки с выхода реакторов – 10–12 охлаждают, отделяют метанол-сырец и подают его в накопитель – 13, а отходящие газы нагревают и подают в следующий по ходу газового потока реактор синтеза метанола. Хвостовые газы из реактора – 12 утилизируют.

Программа численных исследований включала три этапа. Первый этап заключался в расчете термодинамики процесса парциального окисления природного газа в ГСГ для указанных сочетаний компонентов и параметров режима ПОМ с целью получения балансовых характеристик водородсодержащего газа на выходе ГСГ. Второй этап включал расчет оптимизированных балансовых составов водородсодержащего газа на входе в блок синтеза метанола. На третьем этапе проводились собственно расчеты выходов метанола в реакторах каскада синтеза метанола для различных вариантов состава газа.

## Описание методики и результатов численных экспериментов

В табл. 1–4 представлены фрагменты термодинамических расчетов парциального окисления ПГ приведенного состава. В расчетах не учитывался сопутствующий ПОМ нежелательный процесс «сажеобразования», кинетика которого недостаточно изучена [31–35]. С целью профилактики сажеобразования в установке предусмотрены специальные меры, связанные с улучшением смесеобразования, увлажнением исходного сырья и др. [22, 29]. Увлажнение сырья и впрыск воды в испарительную камеру приводят к увеличению отношения  $\text{H}_2/\text{CO}$  вследствие протекания реакции водяного газа и слабой конверсии оксида углерода при отсутствии катализатора. Этот факт учитывался при моделировании путем искусственного введения 5 %-го ограничения на степень конверсии  $\text{CO}$ , что согласуется с экспериментальными данными работ [16, 30, 32].

**Таблица 1.** Мольный состав газовых потоков в ГСГ при парциальном окислении ПГ воздухом

**Table 1.** Molar composition of gas flows in the syngas generator during partial oxidation of natural gas by air

Поток Flow	T, °C	Состав/Composition							$\text{H}_2/\text{CO}$
		$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	
окислитель в 3* oxidant in 3*	250	–	–	–	–	–	0,78	0,22	–
сырье в 3* feedstock in 3*	400	0,850	–	–	–	0,130	0,008	–	–
газ после 4* gas after 4*	1250	0,000	0,143	0,023	0,242	0,107	0,485	–	1,70
газ после 5* gas after 5*	900	0,000	0,118	0,025	0,213	0,227	0,417	–	1,81

\* – потоки указаны на рис. 1/\* – flows are shown in fig. 1.

**Таблица 2.** Мольный состав газовых потоков в ГСГ при парциальном окислении ПГ обогащенным воздухом с концентрацией кислорода 35 % об.

**Table 2.** Molar composition of gas flows in the syngas generator during partial oxidation of natural gas with enriched air with an oxygen concentration of 35 % vol.

Поток Flow	T, °C	Состав/Composition							$\text{H}_2/\text{CO}$
		$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	
окислитель в 3* oxidant in 3*	250	–	–	–	–	–	0,65	0,35	–
сырье в 3* feedstock in 3*	400	0,850	–	–	–	0,130	0,008	–	–
газ после 4* gas after 4*	1430	0,00	0,196	0,023	0,329	0,132	0,320	–	1,68
газ после 5* gas after 5*	900	0,000	0,214	0,034	0,384	0,003	0,365	–	1,79

\* – потоки указаны на рис. 1/\* – flows are shown in fig. 1.

**Таблица 3.** Мольный состав газовых потоков в ГСГ при парциальном окислении ПГ обогащенным воздухом с концентрацией кислорода 70 % об.

**Table 3.** Molar composition of gas flows in the syngas generator during partial oxidation of natural gas with enriched air with an oxygen concentration of 70 % vol.

Поток Flow	T, °C	Состав/Composition							H <sub>2</sub> /CO
		CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
окислитель в 3* oxidant in 3*	250	–	–	–	–	–	0,30	0,70	–
сырье в 3* feedstock in 3*	400	0,850	–	–	–	0,130	0,008	–	–
газ после 4* gas after 4*	1400	0,001	0,272	0,021	0,493	0,126	0,088	–	1,81
газ после 5* gas after 5*	900	0,001	0,212	0,026	0,409	0,281	0,071	–	1,93

\* – потоки указаны на рис. 1/\* – flows are shown in fig. 1.

**Таблица 4.** Мольный состав газовых потоков в ГСГ при парциальном окислении ПГ кислородом

**Table 4.** Molar composition of gas flows in the syngas generator during partial oxidation of natural gas with oxygen

Поток Flow	T, °C	Состав/Composition							H <sub>2</sub> /CO
		CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
окислитель в 3* oxidant in 3*	170	–	–	–	–	–	–	1,0	–
сырье в 3* feedstock in 3*	400	0,850	–	–	–	0,130	0,008	–	–
газ после 4* gas after 4*	1490	0,003	0,300	0,021	0,536	0,141	0,003	–	1,79
газ после 5* gas after 5*	900	0,000	0,225	0,026	0,429	0,317	0,002	–	1,91

\* – потоки указаны на рис. 1/\* – flows are shown in fig. 1.

Полученные данные позволяют сформулировать следующие выводы:

- H<sub>2</sub>/CO в газе на выходе камеры сгорания ГСГ изменяется в диапазоне от 1,6 до 1,8, что в определяющей степени зависит от значений коэффициента избытка окислителя;
- при отсутствии коррекции состава водородсодержащего газа M<1,5 при любых вариациях параметров режима ПОМ и типа окислителя.

Таким образом, показатели качества состава водородсодержащего газа, получаемого в результате ПОМ, для любых типов окислителей существенно ниже рекомендуемых значений для оптимального синтеза метанола.

С целью оптимизации состава водородсодержащего газа предложены способы, устройства и алгоритмы [28–30]. В соответствии с рекомендациями этих работ выполнены расчеты скорректированных материальных балансов газовых потоков для всех вариантов составов, приведенных в табл. 1–4. Оптимизированные и неоптимизированные варианты составов газовых потоков с учетом теплообменных процессов и сепарации водяного пара перед подачей газа в комплекс синтеза метанола являются исходными данными для расчетов выхода метанола в реакторах 11–13.

Для расчета процесса конверсии могут быть использованы два известных в литературе механизма каталитического синтеза метанола и их комбинация. Первый описывается двумя экзотермическими макрореакциями в присутствии цинк-хромовых катализаторов [2, 3]: CO+2H<sub>2</sub>=CH<sub>3</sub>OH, CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>=CO+H<sub>2</sub>O. Второй механизм предложен А.Я. Розовским применительно к каталитическому синтезу метанола на медьсодержащих катализаторах и также основан на протекании двух экзотермических макрореакций [3]: CO<sub>2</sub>+3H<sub>2</sub>=CH<sub>3</sub>OH+H<sub>2</sub>O, CO+H<sub>2</sub>O=CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>.

Все приведенные реакции являются обратимыми. Основными факторами, влияющими на выход метанола, скорость протекания реакций и степень конверсии оксидов углерода, являются: давление, температура в зоне реакции, отношения H<sub>2</sub>/CO и CO/CO<sub>2</sub>, значение модуля газа, содержание водяного пара и инертных компонентов в реакционной зоне [1–4, 17–19]. Наличие инертных компонентов – остаточного метана и азота – снижает парциальное (эффективное) давление реагирующих веществ, вследствие чего степень конверсии оксидов углерода уменьшается [2–4, 17–19]. Основным ингибитором синтеза является водяной пар [2, 3]. По указанной причине для увеличения степени конверсии водородсодержащего газа в описываемой установке применяют проточный трехреакторный каскад с выводом продуктов – метанола и воды – после каждого реактора [3, 19].

По мнению многих авторов, на практике работают оба механизма синтеза метанола через оксиды углерода. Расчеты равновесия по обоим механизмам дают близкие результаты и хорошее совпадение с экспериментальными данными [4, 20]. Проведено моделирование равновесных процессов выхода метанола для различных вариантов балансовых составов водородсодержащего газа, поступающих в первый реактор – 10 каскада синтеза метанола. Варианты отличаются используемым типом окислителя (воздух, обогащенный воздух, кислород), а также наличием или отсутствием коррекции состава. В табл. 5, 6 представлены фрагменты результатов численных расчетов для компонентов ПГ – обогащенный воздух с концентрацией кислорода 70 % об. Объемная скорость катализа принималась равной 10000, номинальный массовый расход газа на входе в первый реактор каскада составлял 1000–3400 кг/ч в зависимости от концентрации кислорода в окислителе, что соответствует расчетной производительности установки 2500–5000 т метанола в год [36].

Итоговые результаты моделирования процессов выхода метанола (количество метанола в кг, получаемое из 1000 м<sup>3</sup> природного газа) в трехреакторном каскаде синтеза метанола для разных вариантов исходных данных, отличающихся концентрацией кислорода в окислителе, степенью конверсии синтез-газа в каждом реакторе каскада, наличием или отсутствием коррекции состава синтез-газа, отображены на рис. 2. В табл. 7 представлены материальные балансы в малотоннажной установке при различных принимаемых в расчетах степенях конверсии газа, убывающих в каждом последующем реакторе синтеза (50 %–20 %–10 %).

**Таблица 5.** Материальный баланс комплекса синтеза метанола (окислитель – обогащенный воздух,  $O_2$  – 70 % об.,  $M=1,62$ )

**Table 5.** Material balance of the methanol synthesis complex (oxidizer – enriched air,  $O_2$  – 70 % vol.,  $M=1,62$ )

Поток Flow	T, °C	Расход/Consumption		Состав/Composition						
		м <sup>3</sup> /ч	кг/ч	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	MeOH
газ в реактор 10* gas to reactor 10*	210	2,97	1265	0,001	0,243	0,073	0,585	0,003	0,095	0,000
метанол из 10* methanol out of 10*	40	0,45	360	0,000	0,002	0,036	0,003	0,024	0,003	0,935
газ в реактор 11* gas to reactor 11*	220	1,94	905	0,002	0,192	0,109	0,539	0,000	0,149	0,009
метанол из 11* methanol out of 11*	40	0,10	76	0,000	0,002	0,037	0,004	0,001	0,004	0,953
газ в реактор 12* gas to reactor 12*	230	1,73	829	0,002	0,174	0,122	0,524	0,000	0,169	0,009
метанол из 12* methanol out of 12*	40	0,04	31	0,000	0,002	0,039	0,004	0,000	0,004	0,952
хвостовые газы (на утилизацию) tail gases (for recycling)	40	1,64	798	0,002	0,165	0,128	0,517	0,000	0,179	0,009

\* – потоки указаны на рис. 1/\* – flows are shown in fig. 1.

**Таблица 6.** Материальный баланс комплекса синтеза метанола (окислитель – обогащенный воздух,  $O_2$  – 70 % об.,  $M=2,05$ )

**Table 6.** Material balance of the methanol synthesis complex (oxidizer – enriched air,  $O_2$  – 70 % vol.,  $M=2,05$ )

Поток Flow	T, °C	Расход/Consumption		Состав/Composition						
		м <sup>3</sup> /ч	кг/ч	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	MeOH
газ в реактор 10* gas to reactor 10*	210	3,040	1200	0,001	0,255	0,029	0,612	0,003	0,100	0,000
метанол из 10* methanol out of 10*	40	0,488	389	0,000	0,002	0,013	0,004	0,004	0,004	0,954
газ в реактор 11* gas to reactor 11*	220	1,910	811	0,002	0,206	0,044	0,578	0,000	0,161	0,009
метанол из 11* methanol out of 11*	40	0,103	82	0,000	0,002	0,015	0,004	0,000	0,004	0,974
газ в реактор 12* gas to reactor 12*	230	1,679	729	0,002	0,189	0,050	0,566	0,000	0,184	0,009
метанол из 12* methanol out of 12*	40	0,042	33	0,000	0,002	0,016	0,004	0,000	0,005	0,974
хвостовые газы (на утилизацию) tail gases (for recycling)	40	1,586	696	0,002	0,180	0,053	0,561	0,000	0,195	0,009

\* – потоки указаны на рис. 1/\* – flows are shown in fig. 1.

**Таблица 7.** Сводные балансовые расходы в установке

**Table 7.** Summary balance sheet expenses in the installation

<div>Расходы Consumption</div> <div>Концентрация O<sub>2</sub>, % об. Density, O<sub>2</sub>, % vol.</div>	Поток газа в газогенераторе Gas consumption in the syngas generator	Поток газа в блоке синтеза метанола Gas consumption in the methanol synthesis unit	Выход метанола Methanol yield	Мощность установки, т/год Plant capacity, t/year
	кг/ч/kg/hour			
22 % б/к* w/c	3650	3431	315	2759
22 % с/к** a/c	3650	3341	363	3180
35 % б/к w/c	2438	2235	363	3180
35 % с/к a/c	2438	2149	416	3644
70 % б/к w/c	1399	1265	437	3828
70 % с/к a/c	1399	1201	486	4257
100 % б/к w/c	1168	1016	449	3933
100 % с/к a/c	1168	962	526	4607

\*б/к – без коррекции состава газа, \*\*с/к – после коррекции состава газа.

\*w/c – without correction gas composition, \*\*a/c – after correction of gas composition.

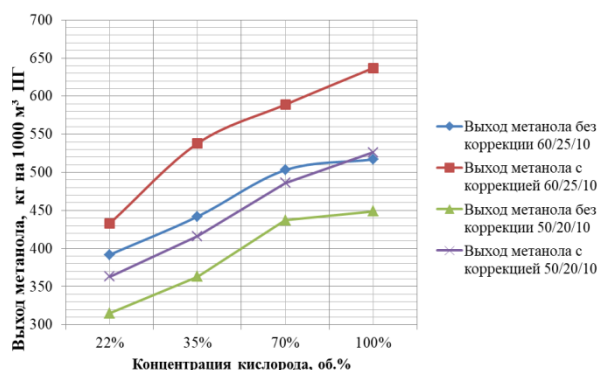


Рис. 2. Зависимость выхода метанола от типа окислителя, параметров синтез-газа и степени конверсии синтез-газа в реакторах каскада синтеза метанола

Fig. 2. Dependence of methanol yield on the oxidizer type, synthesis gas parameters, and synthesis gas conversion degree in methanol synthesis cascade reactors

### Заключение

Во-первых, полученные результаты подтверждают известный факт, что повышение выхода метанола достигается, прежде всего, увеличением концентрации кислорода в окислителе при проведении парциального окисления. Так, при концентрации кислорода

в окислителе 35 % выход метанола по сравнению с воздухом в качестве окислителя увеличивается на 15 %, при 70 % – на 39 %, при использовании технически чистого кислорода – на 43 %. Этот вывод качественно и количественно подтверждает известные результаты работ [19, 20], в которых рассмотрены особенности синтеза метанола на забалластированном азотом синтез-газе.

Во-вторых, коррекция состава водородсодержащего газа обеспечивает дополнительный прирост выхода метанола на 8–12 %, причем относительный прирост остается примерно постоянным вне зависимости от принимаемой в расчетах степени конверсии газа в реакторах каскада синтеза метанола. Однако количественная оценка увеличения выхода метанола нуждается в экспериментальной проверке.

В-третьих, наблюдается нелинейная зависимость удельного выхода метанола от концентрации кислорода в окислителе, проявляющаяся в относительном уменьшении приростов выхода метанола с увеличением концентрации кислорода, в особенности в диапазоне концентраций свыше 70 % об. Найденная закономерность требует дополнительного изучения, в случае ее экспериментального подтверждения возможна оптимизация эксплуатационных расходов на окислитель.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wernicke H.-J., Plass L., Schmidt F. Methanol generation // Methanol: the basic chemical and energy feedstock of the future. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – P. 51–301.
- Технология синтетического метанола / М.М. Караваев, В.Е. Леонов, И.Г. Попов, Е.Т. Шепелев. – М.: Изд-во: «Химия», 1984. – 240 с.
- Розовский А.Я., Лин Г.И. Теоретические основы процесса синтеза метанола. – М.: Изд-во: «Химия», 1990. – 272 с.
- Технология автотермического риформинга для современных крупнотоннажных метанольных установок / П.Ю. Даль, Т.С. Кристенсен, С. Винтер-Мадсен, С.М. Кинг // Азот и синтез-газ-2014: Международная конференция. – Париж: Хальдор Топсе А/О, 2014. – 14 с.
- Westertep K.R. New methanol processes // Pilavachi P.A. Energy efficiency in process technology. – Dordrecht: Springer, 1993 – P. 1142–1153.
- Liu W.-C., Baek J., Somorjai G.A. The Methanol economy: methane and carbon dioxide conversion // Topics in Catalysis. – 2018. – Iss. 7–8. – P. 530–541.
- Glazov S.V. Estimation of the characteristics of the partial oxidation conversion of organic fuel gasification products to a synthesis gas, Russia, Moscow region // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2019. – V. 53. – № 3. – P. 378–388.
- Способ синтеза метанола: пат. Рос. Федерации, № 2519940, заявл. 20.04.2013; опубл. 20.06.2014. Бюл. № 11. – 14 с.
- Способ получения водородсодержащего газа для производства метанола и устройство для его осуществления пат. Рос. Федерации, № 2632846, заявл. 15.08.2016; опубл. 10.10.2017. Бюл. № 28. – 4 с.
- Малотоннажная установка получения метанола пат. Рос. Федерации, № 176510, заявл. 20.06.2017; опубл. 22.01.2018. Бюл. № 3. – 3 с.
- Загашвили Ю.В., Левихин А.А., Кузьмин А.М. Основы проектирования трехкомпонентного газогенератора синтез-газа // Нефтегазохимия. – 2017. – № 4. – С. 9–16.
- Experimental study and kinetics modeling of partial oxidation reactions in heavily sooting laminar premixed methane flames, China, Beijing / Q. Li, T. Wang, Y. Liu, D. Wang. // Chemical Engineering Journal. – 2012. – V. 207–208. – № 1. – P. 235–244.
- Influence of temperature and pressure on the non-catalytic partial oxidation of natural gas / P. Brüggemann, P. Seifert, B. Meyer, M. Müller-Hagedorn // Chemical Product and Process Modeling. – 2010. – V. 5. – № 1. – P. 1–24.
- Process analysis of syngas production by non-catalytic POX of oven gas, China, Shanghai / F. Wang, X. Zhou, W. Guo, Z. Dai, X. Gong, H. Liu, Y. Guangsu, Y. Zunhong // Frontiers of Energy and Power Engineering in China. – 2008. – V. 5. – № 1. – P. 117–122.
- Загашвили Ю.В., Левихин А.А., Кузьмин А.М. Технология получения водорода с использованием малогабаритных транспортёльных установок на основе высокотемпературных газогенераторов синтез-газа // Вопросы материаловедения. – 2017. – № 2. – С. 92–109.
- Управление технологическим процессом получения синтез-газа в высокотемпературном реакторе / Ю.В. Загашвили, Ю.В. Анискевич, А.М. Кузьмин, А.А. Левихин, Г.Б. Савченко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16. – № 10. – С. 704–709.
- Метанол 2019. URL: <http://www.creon-conferences.com/consulting/detailConf.php?ID=126542> (дата обращения 15.03.2020).
- Synthesizing methanol from nitrogen-ballasted syngas, Russia, Moscow / I.I. Lishchiner, O.V. Malova, A.L. Tarasov, V.M. Maslennikov, Y.A. Vyskubenko, L.S. Tolchinskii, Y.L. Dolinskii // Catalysis in Industry. – 2010. – V. 2. – № 4. – P. 368–373.
- Липидус А.Л., Елисеев О.Л., Крючков М.В. Получение углеводородов из синтез-газа, забалластированного азотом // Технология нефти и газа. – 2011. – № 5. – С. 9–12.
- Арутюнов В.С., Савченко В.И., Седов И.В. О перспективах промышленных газохимических технологий на основе азотсодержащего синтез-газа // Нефтегазохимия. – 2016. – № 4. – С. 14–23.
- Комплекс получения синтез-газа для малотоннажного производства метанола / Ю.В. Загашвили, В.Н. Ефремов, А.М. Кузьмин, И.И. Лищинер // Нефтегазохимия. – 2017. – № 1. – С. 19–26.
- Bockhorn H. Soot formation in combustion. – Germany: Springer-Verlag, 1994. – 596 p.
- Zhou X., Chen C., Wang F. Multi-dimensional modeling of non-catalytic partial oxidation of natural gas in a high pressure reformer, China, Shanghai // Journal Hydrogen Energy. – 2010. – V. 35. – № 4. – P. 1620–1629.
- Jaber O., Naterer G.F., Dincer I. Natural gas usage as a heat source for integrated SMR and thermochemical hydrogen production technologies, Canada, Ontario // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – V. 35. – P. 8569–8579.

25. Numerical simulation of natural gas non-catalytic partial oxidation reformer, China, Shanghai / Y. Xu, Z. Dai, C. Li, X. Li, Z. Zhou, G. Yu, F. Wang // *International Journal Hydrogen Energy*. – 2014. – V. 39. – P. 9149–9157.
26. Mevawala C., Jiang Y., Bhattacharyya D. Techno-economic optimization of shale gas to dimethyl ether production processes via direct and indirect synthesis routes, USA, Richland // *Applied Energy*. – 2019. – V. 238. – P. 119–134.
27. Thermodynamic and economic analysis of a plant for the CO<sub>2</sub> hydrogenation for methanol production, Germany, Essen / D. Bellotti, M. Dierks, F. Moellenbruck, L. Magistri, K. Gömer, G. Oeljeklaus // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – V. 1. – P. 1–7.
28. Загашвили Ю.В., Левихин А.А., Кузьмин А.М. Основы проектирования трехкомпонентного газогенератора синтез-газа // *Нефтегазохимия*. – 2017. – № 4. – С. 9–16.
29. Способ получения водородсодержащего газа для производства метанола и устройство для его осуществления пат. Рос. Федерации, № 2632846, заявл. 15.08.2016; опубл. 10.10.2017. Бюл. № 28. – 4 с.
30. Малотоннажная установка получения метанола пат. Рос. Федерации, № 176510, заявл. 20.06.2017; опубл. 22.01.2018. Бюл. № 3. – 3 с.
31. Загашвили Ю.В., Кузьмин А.М. Управление составом синтез-газа для малотоннажного производства метанола // *Технологии нефти и газа*. – 2018. – № 3. – С. 54–59.
32. Образование высокодисперсной сажи при получении синтез-газа в условиях горения метана / И.В. Билера, А.А. Борисов, А.Б. Борунов, Ю.А. Колбановский, Ю.М. Королёв, И.В. Росихин, И.В. Трошин // *Газохимия*. – 2010. – № 3. – С. 72–78.
33. Сажеобразование в процессе парциального окисления метана в условиях частичного насыщения парами воды / Д.С. Лугвищук, П.И. Кульчаковский, Э.И. Митберг, В.З. Мордкович // *Нефтехимия*. – 2018. – Т. 58. – № 3. – С. 324–331.
34. Arutyunov V.S., Strekova L.N. Kinetic features and technological perspectives of the partial oxidation of light alkanes, Russia, Moscow // *Russian Journal of Physical Chemistry*. – 2012. – V. 6 (4). – P. 486–497.
35. Tran L.S., Glaude P.A., Battin-Leclerc F. Experimental study of the structure of laminar premixed flames of ethanol/methane/oxygen/argon // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2013. – V. 49 (1). – P. 11–18.
36. Отчет о НИР: Теоретическое исследование режимных параметров и облика нового генератора синтез-газа, разработка автоматизированной системы контроля и управления и конструкторской документации генератора / рук. НИР А.М. Кузьмин // ООО «ГСТГ». – СПб.: 2016. – 115 с. URL: <http://www.rosrid.ru/nioktr/JDBZNL5ANBV1BU08S31MDOVM> (дата обращения 28.03.2020).

Поступила 28.03.2020 г.

#### Информация об авторах

**Загашвили Ю.В.**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «ВТР».

**Кузьмин А.М.**, кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; генеральный директор ООО «Генератор синтез-газа»; советник Российской Академии Естественных Наук.



UDC 661.721.422

## INFLUENCE OF HYDROGEN-CONTAINING GAS COMPOSITION ON METHANOL YIELD

Yuriy V. Zagashvili<sup>1</sup>,  
y.zagashvili@yandex.ru

Aleksey M. Kuzmin<sup>2,3,4</sup>,  
kuzmin.lex@gmail.com

<sup>1</sup> LLC «HTR»,  
15/1, Olgi Forsh street, Saint-Petersburg, 195297, Russia.

<sup>2</sup> Baltic State Technical University,  
1/21, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya street, Saint-Petersburg, 190005, Russia.

<sup>3</sup> LLC «GSG»,  
15/1, Olgi Forsh street, Saint-Petersburg, 195297, Russia.

<sup>4</sup> Russian Academy of Natural Sciences,  
38, Serpukhovskaya street, Saint-Petersburg, 190013, Russia.

**The research relevance** is caused by the lack of scientific evidence about methanol yield from natural gas depending on the type of oxidant (oxygen, enriched air or air) and optimization of structure and parameters of hydrogen-containing gas according to the criteria of the ratio of the components of the synthesis gas  $H_2/CO$  and module (factorial) hydrogen-containing gas  $M$  for optimal methanol synthesis. The problem is particularly important for low-tonnage plants producing methanol in field conditions operating on nitrogen-ballasted hydrogen-containing gas.

**The aim** of the research is to evaluate the effect of optimizing the composition of hydrogen-containing gas on the yield of methanol.

**Objects:** low-tonnage plants for production of methanol from hydrogen-containing gas, consisting of a complex for generating hydrogen-containing gas and a complex for the catalytic synthesis of methanol. The complex for generating hydrogen-containing gas includes a three-component synthesis gas generator (natural gas – oxidizer – chemical-treated water), in which the partial oxidation of raw material is carried out, a block of heat exchangers and a block for correcting the composition and parameters of hydrogen-containing gas to ensure the ratio of components  $H_2/CO=2,2-2,8$  and the module  $M=2,0-2,3$ . The complex of catalytic synthesis of methanol includes a flow cascade consisting of three sequentially connected isothermal reactors with the output of raw methanol after each reactor without recirculating the waste and tail gases.

**Methods:** the thermodynamic calculations.

**Results.** The paper confirms the known fact of increasing the specific yield of methanol depending on the concentration of  $O_2$  in the oxidizing agent under partial oxidation of natural gas. It is shown that optimization of the hydrogen-containing gas which goes through the catalytic methanol synthesis provides an increase in specific yield of methanol. Average specific growth yield of methanol during the synthesis in an optimized composition at  $M=2,05$  compared to non-optimized synthesis gas composition is 8–12 %. The increase in specific yield of methanol is maintained regardless of the adopted in the calculation of gas conversion degree of in the reactors of the cascade complex for the synthesis of methanol for all types of oxidizing agents. The authors have identified the nonlinear dependence of methanol yield on the concentration of  $O_2$  in the oxidant. It consists of reducing the increase in specific yield of methanol, when the concentration of  $O_2$  in the oxidizer is over 70 %. The revealed dependence requires additional study and experimental confirmation. It allows optimizing the operating costs of the oxidizer by reducing the specific cost of  $O_2$  on methanol yield from the raw material.

# Key words:

Methanol, synthesis gas, gas generator, thermodynamics, partial oxidation of natural gas.

## REFERENCES

- Wernicke H.-J., Plass L., Schmidt F. *Methanol generation. methanol: the basic chemical and energy feedstock of the future*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. pp. 51–301.
- Karavayev M.M., Leonov V.E., Popov I.G., Shepelev E.T. *Tekhnologiya sinteticheskogo metanola* [Synthetic methanol technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 240 p.
- Rozovskiy A.Ya., Lin G.I. *Teoreticheskie osnovy protsessa sinteza metanola* [The theoretical basis of the process of methanol synthesis]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 272 p.
- Dal P.Yu., Kristensen T.S., Vinter-Madsen S., King S.M. *Tekhnologiya avtotermicheskogo riforminga dlya sovremennykh krupnotonnazhnykh metanolnykh ustanovok* [The autothermal reforming technology for modern large-scale methanol plants]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii. Azot i sintez-gaz-2014* [Proc. International conference. Nitrogen and synthesis gas-2014]. Paris, 2014. 14 p.
- Westerterp K.R. New methanol processes. Pilavachi P.A. *energy efficiency in process technology*. Dordrecht, Springer, 1993. pp. 1142–1153.
- Liu W.-C., Baek J., Somorjai G.A. The Methanol economy: methane and carbon dioxide conversion. *Topics in Catalysis*, 2018, Iss. 7–8, pp. 530–541.
- Glazov S.V. Estimation of the characteristics of the partial oxidation conversion of organic fuel gasification products to a synthesis gas, Russia, Moscow region. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2019, vol. 53, no. 3, pp. 378–388.
- Ostuni R., Filippi E. *Sposob sinteza metanola* [Method for methanol synthesis]. Patent RF, no. 2519940, 2014.
- Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M. *Sposob polucheniya vodorodsoderzhashchego gaza dlya proizvodstva metanola i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of producing a hydrogen-containing gas for producing methanol and device for its implementation]. Patent RF, no. 2632846, 2017.
- Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M. *Malotonnazhnaya ustanovka polucheniya metanola* [Low-tonnage methanol production unit]. Patent RF, no. 176510, 2018.
- Zagashvili Yu.V., Levikhin A.A., Kuzmin A.M. Design basics for a threecomponent syngas gas generator. *Neftegazokhimiya*, 2017, no. 4, pp. 9–16. In Rus.

12. Li Q., Wang T., Liu Y., Wang D. Experimental study and kinetics modeling of partial oxidation reactions in heavily sooting laminar premixed methane flames, China, Beijing. *Chemical Engineering Journal*, 2012, vol. 207–208, no. 1, pp. 235–244.
13. Brüggemann P., Seifert P., Meyer B., Müller-Hagedorn M. Influence of temperature and pressure on the non-catalytic partial oxidation of natural gas. *Chemical Product and Process Modeling*, 2010, vol. 5, pp. 1–24.
14. Wang F., Zhou X., Guo W., Dai Z., Gong X., Liu H., Guangsu Y., Zunhong Y. Process analysis of syngas production by non-catalytic POX of oven gas, China, Shanghai. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 117–122.
15. Zagashvili Y.V., Levihin A.A., Kuzmin A.M., Production of hydrogen by using small-scale transportable plants based on high-temperature syngas generators. *Voprosy Materialovedeniya*, 2017, no. 2, pp. 92–109. In Rus.
16. Zagashvili Y.V., Aniskevich Y.V., Kuzmin A.M., Levikhin A.A., Savchenko G.B. Management of technological process of producing synthesis gas in a high temperature reactor. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 704–709. In Rus.
17. *Metanol 2019* [Methanol 2019]. Available at: <http://www.creon-conferences.com/consulting/detailConf.php?ID=126542> (accessed 15 March 2020).
18. Lishchiner I.I., Malova O.V., Tarasov A.L., Maslennikov V.M., Vyskubenko Y.A., Tolchinskii L.S., Dolinskii Y.L. Synthesizing methanol from nitrogen-ballasted syngas, Russia, Moscow. *Catalysis in Industry*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 368–373.
19. Lapidus A.L., Eliseev O.L., Kryuchkov M.V. Hydrocarbons production from synthesis gas, ballasted with nitrogen. *Science and Technology of Hydrocarbons*, 2011, no. 5, pp. 9–12.
20. Arutyunov V.S., Savchenko V.I., Sedov I.V., On the prospects of commercial gas chemical technologies based on nitrogen-containing synthesis gas. *NefteGazoKhimiya*, 2016, no. 4, pp. 14–23. In Rus.
21. Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M., Lishchiner I.I. Complex for obtaining synthesis gas for small tonnage production of methanol. *Neftegazokhimiya*, 2017, no. 1, pp. 19–26. In Rus.
22. Bockhorn H. *Soot formation in combustion*. Germany, Springer-Verlag, 1994. 596 p.
23. Zhou X., Chen C., Wang F. Multi-dimensional modeling of non-catalytic partial oxidation of natural gas in a high pressure reformer, China, Shanghai. *Journal Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, no. 4, pp. 1620–1629.
24. Jaber O., Naterer G.F., Dincer I. Natural gas usage as a heat source for integrated SMR and thermochemical hydrogen production technologies, Canada, Ontario. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, pp. 8569–8579.
25. Xu Y., Dai Z., Li C., Li X., Zhou Z., Yu G., Wang F. Numerical simulation of natural gas non-catalytic partial oxidation reformer, China, Shanghai. *International Journal Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, pp. 9149–9157.
26. Mevawala C., Jiang Y., Bhattacharyya D. Techno-economic optimization of shale gas to dimethyl ether production processes via direct and indirect synthesis routes, USA, Richland. *Applied Energy*, 2019, vol. 238, pp. 119–134.
27. Bellotti D., Dierks M., Moellenbruck F., Magistri L., Görner K., Oeljeklaus G. Thermodynamic and economic analysis of a plant for the CO<sub>2</sub> hydrogenation for methanol production, Germany, Essen. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 1, pp. 1–7.
28. Zagashvili Yu.V., Levikhin A.A., Kuzmin A.M. Design basics for a threecomponent syngas gas generator. *Neftegazokhimiya*, 2017, no. 4, pp. 9–16. In Rus.
29. Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M. *Sposob polucheniya vodorodsoderzhashchego gaza dlya proizvodstva metanola i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of producing a hydrogen-containing gas for producing methanol and device for its implementation]. Patent RF, no. 2632846, 2017.
30. Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M. *Malotonnazhnaya ustanovka polucheniya metanola* [Low-tonnage methanol production unit]. Patent RF, no. 176510, 2018.
31. Zagashvili Yu.V., Kuzmin A.M. Management of the synthesis gas composition for low-tonnage production of methanol. *Tekhnologii nefti i gaza*, 2018, no. 3, pp. 54–59. In Rus.
32. Bilera I.V., Borisov A.A., Borunov A.B., Kolbanovskij Yu.A., Korolev Yu.M., Rossihin I.V., Troshin I.V. The formation of finely dispersed carbon black in the preparation of synthesis gas under conditions of combustion of methane. *Gazokhimiya*, 2010, no. 3 (13), pp. 72–78. In Rus.
33. Lugvishchuk D.S., Kulchakovskiy P.I., Mitberg E.I., Mordkovich V.Z. Sazheobrazovanie v protsesse partialnogo okisleniya metana v usloviyakh chastichnogo nasyscheniya parami vody [Soot formation during partial methane oxidation under conditions of partial water vapor saturation]. *Neftekhimiya*, 2018, vol. 58, no. 3, pp. 324–331.
34. Arutyunov V.S., Strekova L.N. Kinetic features and technological perspectives of the partial oxidation of light alkanes, Russia, Moscow. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2012, vol. 6, pp. 486–497.
35. Tran L.S., Glaude P.A., Battin-Leclerc F. Experimental study of the structure of laminar premixed flames of ethanol/methane/oxygen/argon. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2013, vol. 49, pp. 11–18.
36. Otchet o NIR. *Teoreticheskoe issledovanie rezhimnykh parametrov i oblika novogo generatora sintez-gaza, razrabotka avtomatizirovannoy sistemy kontrolya i upravleniya i konstruktorskoj dokumentatsii generatora* [Theoretical investigation of operational parameters and appearance of a new generator of synthesis gas, development of automated system control and generator design documentation]. Available at: <http://www.rosrid.ru/nioktr/JDBZNL5ANBV1BU08S31MDOVM> (accessed 28 March 2020).

Received: 28 March 2020.

#### Information about the authors

**Yuriy V. Zagashvili**, Dr. Sc., professor, general director of LLC «HTR».

**Aleksey M. Kuzmin**, Cand. Sc., associated professor, Baltic State Technical University; general director LLC «GSG»; council of the Russian Academy of Natural Sciences.

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](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 28.10.2020. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 22,80. Уч.-изд. л. 20,62.  
Заказ 147-20. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ