

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 331, № 4, 2020

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

## Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
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)  
Абутапилова Е.М., д-р техн. наук (Россия)  
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)  
Зюзев А.М., д-р техн. наук (Россия)  
Кирьянова Л.Г., выпуск. редактор, 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, № 4, 2020

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

**Editorial Board**

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

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Региональные особенности эколого-геохимического состояния поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири**  
Марков М.Л., Потапова Т.М., Задонская О.В. 7  
**Regional features of ecological geochemical condition of surface water bodies in taiga zone of Western Siberia**  
Markov M.L., Potapova T.M., Zadonskaya O.V.
- Влияние геологических факторов на распределение урана и тория в солевых отложениях питьевых вод (Республика Башкортостан)**  
Фархутдинов И.М., Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П., Фархутдинов А.М., Злобина А.Н., Исмагилов Р.А., Никонов В.Н., Белан Л.Н. 16  
**Influence of geological factors on uranium and thorium distribution in drinking water salt deposits (Republic of Bashkortostan)**  
Farkhutdinov I.M., Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Farkhutdinov A.M., Zlobina A.N., Ismagilov R.A., Nikonov V.N., Belan L.N.
- Колчеданные месторождения энзиматических островных дуг Казахстана на примере месторождения Абыз**  
Мазуров А.К., Рудмин М.А., Байболова Ш.Ж., Кряжева Т.В. 28  
**Massive sulfide deposits of ensimatic island arcs of Kazakhstan on the example of Abyz deposit**  
Mazurov A.K., Rudmin M.A., Baibolova Sh.Zh., Kryazheva T.V.
- Критические товарные потоки марганцевого сырья в России**  
Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю. 38  
**Critical commodity flows of manganese raw materials in Russia**  
Boyarko G.Yu., Khatkov V.Yu.
- Микроэлементный состав подземных вод верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней Оби как фактор формирования их эколого-геохимического состояния**  
Пасечник Е.Ю., Гусева Н.В., Савичев О.Г., Льготин В.А., Балобаненко А.А., Домаренко В.А., Владимиров О.Н. 54  
**Trace elements composition of underground waters of the upper hydrogeodynamic zone in the basin of upper Ob as a factor of formation of their ecological-geochemical condition**  
Pasechnik E.Yu., Guseva N.V., Savichev O.G., Lgotin V.A., Balobanencko A.A., Domarenko V.A., Vladimirova O.N.
- Кондуктивно-конвективный теплоперенос в тонкопленочной тепловой изоляции**  
Половников В.Ю. 64  
**Conductive-convective heat transfer in thin-film thermal insulation**  
Polovnikov V.Yu.
- Исследование аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля их безопасности**  
Ахметов Е.М., Асемов К.М., Жуматаева М.О. 70  
**Research of accidents of hydraulic structures and safety control methods**  
Akhmetov Y.M., Assemov K.M., Zhumataeva M.O.
- Александровское золоторудное месторождение (Восточное Забайкалье): источники вещества пород и руд**  
Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Боровиков А.А., Бадмацыренова Р.А., Посохов В.Ф. 83  
**Alexandrovskoe gold deposit (Eastern Transbaikalia): sources of rock and ore substance**  
Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Borovikov A.A., Badmatsyrenova R.A., Posokhov V.F.
- Методы увеличения нефтеотдачи на месторождениях Югры**  
Кузьменков С.Г., Аюпов Р.Ш., Новиков М.В., Исаев В.И., Лобова Г.А., Стулов П.А., Бутин В.С., Астапенко Е.О. 96  
**Enhanced oil recovery methods at fields of Yugra**  
Kuzmenkov S.G., Ayupov R.Sh., Novikov M.V., Isaev V.I., Lobova G.A., Stulov P.A., Butin V.S., Astapenko E.O.
- Новый подход к оценке результатов гидравлического разрыва пласта (на примере Бобриковской залежи Шершневого месторождения)**  
Галкин В.И., Пономарева И.Н., Черепанов С.С., Филиппов Е.В., Мартюшев Д.А. 107  
**New approach to the study of the results of hydraulic fracturing (on the example of Bobrikovsky deposits of the Shershnevsky field)**  
Galkin V.I., Ponomareva I.N., Cherepanov S.S., Filippov E.V., Martyushev D.A.
- Голоморфное погружение как аналитический метод расчета электрических сетей нефтяных и газовых месторождений**  
Исаев Ю.Н., Кабалин Д.А. 115  
**Holomorphic embedding as analytical technique for calculating electric grids of oil and gas deposits**  
Isaev Yu.N., Kabalin D.A.
- Проблемы контроля фильтрации вод через гидротехнические сооружения в условиях вечной мерзлоты**  
Юркевич Н.В., Юркевич Н.В., Гуреев В.Н., Мазов Н.А. 126  
**Problems of controlling water filtration in hydraulic structures in permafrost regions**  
Yurkevich N.V., Yurkevich N.V., Gureyev V.N., Mazov N.A.
- Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией. III. Стадия падающей скорости сушки**  
Саломатов В.В., Карелин В.А., Саломатов В.В. 139  
**Electromagnetic drying of wet materials with a small depth of penetration of microwave radiation in the conditions of heat removal by radiation and convection. III. Stage of falling drying rate**  
Salomatov V.V., Karelin V.A., Salomatov V.V.
- Оптимизация ультразвукового эмульгирования при механическом перемешивании**  
Афанасенко В.Г., Кулаков П.А., Боев Е.В., Имаева Э.Ш., Давлетов О.Б., Мазидуллин Д.Н. 148  
**Optimization of ultrasound emulsion under mechanical mixing**  
Afanasenko V.G., Kulakov P.A., Boev E.V., Imaeva E.Sh., Davletov O.B., Mazidullin D.N.
- Типы, размещение и перспективы палеогеновых и неогеновых россыпей золота в Западно-Калбинском золотоносном районе (Восточный Казахстан)**  
Третьяков А.В., Нигматова С.А., Габитова У.Б. 156  
**Types, distribution and perspectives of Paleogene and Neogene alluvial gold in West-Kalba gold-bearing district (East Kazakhstan)**  
Tretyakov A.V., Nigmatova S.A., Gabitova U.B.
- Оценка состояния и мониторинг процесса воронкообразования при подземной разработке системами с блочным обрушением**  
Ефремов Е.Ю., Дорохов Д.В. 170  
**Determination of the surface collapse process phase caused by block caving mining**  
Efremov E.Yu., Dorokhov D.V.

<b>Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды</b> Бурмистров К.В., Осинцев Н.А.	<b>179</b>	<b>Principles of sustainable development of mining and technical systems in transitional periods</b> Burmistrov K.V., Osintsev N.A.
<b>Численное исследование устойчивости грунта с использованием геофизических данных</b> Татаурова А.А., Мельник Е.А., Стефанов Ю.П.	<b>196</b>	<b>Evaluation of soil stability by numerical modeling</b> Tataurova A.A., Melnik E.A., Stefanov Yu.P.
<b>Экспериментальные исследования эффекта Холла в земле при зондированиях становлением поля в ближней зоне</b> Могилатов В.С., Потапов В.В., Захаркин А.К., Гурьев В.А., Шеин А.Н.	<b>203</b>	<b>Experimental study of the Hall effect in the earth at the controlled source transient electromagnetic method</b> Mogilatov V.S., Potapov V.V., Zaharkin A.K., Gurev V.A., Shein A.N.
<b>Оценка охвата пласта системой разработки с помощью радиуса дренирования скважин</b> Поплыгин В.В., Соколов А.В.	<b>215</b>	<b>Estimation of a reservoir coverage by the development system using the draining well radius</b> Poplygin V.V., Sokolov A.V.

УДК 550.46

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Марков Михаил Леонидович<sup>1</sup>,  
2019mml@mail.com

Потапова Татьяна Михайловна<sup>2</sup>,  
ptm2000@mail.ru

Задонская Ольга Викторовна<sup>1</sup>,  
ov-zadon@yandex.ru

<sup>1</sup> Государственный гидрологический институт,  
Россия, 199053, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 2-я линия, 23.

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

**Актуальность.** Количественная оценка эколого-геохимического состояния поверхностных вод и факторов их формирования является одним из важнейших этапов управления водными ресурсами, определяющим эффективность мероприятий по комплексному использованию и охране вод.

**Цель:** количественная оценка региональных особенностей современного эколого-геохимического состояния поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири.

**Методы:** методы определения химического состава вод: титриметрический, турбидиметрический, фотометрический, ионная хроматография, инверсионно-вольт-амперометрический, атомно-абсорбционный, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой; статистические методы.

**Результаты и выводы.** По результатам анализа материалов многолетних гидрохимических наблюдений Росгидромета и ряда других организаций рассмотрены региональные особенности эколого-геохимического состояния поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири. Показано, что химический состав поверхностных вод в регионе в значительной степени определяется природными процессами заболачивания, вследствие чего наблюдается нарушение рыбохозяйственных и хозяйственно-питьевых нормативов качества по величине pH, содержанию  $\text{NH}_4^+$ , Fe, Al, Mn, фенолов, веществ, идентифицируемых как «нефтепродукты», а также рыбохозяйственных нормативов – по содержанию  $\text{NO}_2^-$ , фосфатов, Cu, Zn и хозяйственно-питьевых – по величине бихроматной и перманганатной окисляемости. Установлено, что антропогенное влияние достаточно надежно выявляется по повышению содержания хлорид-иона (в пределах предельно допустимых концентраций, но в 2–3 раза выше фоновых значений). Разработаны рекомендации по организации процесса оценки гидрохимического фона. На основе региональных фоновых концентраций загрязняющих веществ и расходов воды на режимных створах сибирских рек могут быть определены степени разбавления сточных вод, сбрасываемых в реки, с сильно заболоченными водосборами. Эти расчеты должны быть положены в основу утвержденных нормативов допустимых воздействий на речную сеть таежной зоны Западной Сибири.

### Ключевые слова:

Воды речные, озерные воды, болотные воды, химический состав, таежная зона, Западная Сибирь.

### Введение

Таежная зона Западно-Сибирской равнины занимает площадь около 1,2 млн км<sup>2</sup>, примерно 90 % которой приходится на бассейн р. Обь. Ключевой особенностью этой территории являются интенсивная нефтегазодобыча, в процессе которой ежедневно сжигается 6–7 млрд м<sup>3</sup> попутного газа, размещается огромное количество отходов бурения и происходит не менее одной аварии с потерей в среднем 2 т нефти, причем общие потери углеводородов достигают 7–20 % от суммарной добычи [1–3]. Другая важная особенность – исключительно высокая заболоченность водосборов с продолжающимся приростом торфяной залежи со скоростью примерно 1 мм/год [4, 5]. Все вместе это определяет современное эколого-геохимическое состояние поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири, характеризующееся распространением пресных вод с преобладанием в ионном составе, как правило,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ ,

высоким содержанием органических веществ и продуктов их трансформации, в том числе в концентрациях, существенно превышающих установленные предельно допустимые значения для водных объектов хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного назначения [6–8]. На основе региональных фоновых концентраций загрязняющих веществ и расходов воды на режимных створах сибирских рек могут быть определены степени разбавления сточных вод, сбрасываемых в реки с сильно заболоченными водосборами. Эти расчеты должны быть положены в основу утвержденных нормативов допустимых воздействий на речную сеть таежной зоны Западной Сибири.

С учетом указанных особенностей и в целях повышения эффективности экологического мониторинга и планируемых на его результатах природоохранных мероприятий требуется количественная оценка факторов формирования эколого-геохимического состояния поверхностных вод региона и допустимых антропо-

генных воздействий на водные объекты. Первым этапом решения подобной задачи является комплексная оценка современного эколого-геохимического состояния водных объектов, что и определило содержание рассматриваемой работы. Основное внимание было уделено изучению водных объектов в бассейне р. Оби на территории Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа.

#### Исходная информация и методика исследования

В качестве исходной информации использованы опубликованные данные многолетних наблюдений Росгидромета на реках, материалы экспедиционных исследований рек, озер, болот, подземных вод Государственного гидрологического института (ГГИ), Томского политехнического университета (ТПУ), ОАО «Томскгеомониторинг», Томского филиала Института геологии и геофизики Сибирского отделения Российской Академии наук (ТФ ИГНГ СО РАН), полученные при непосредственном участии и/или под руководством авторов совместно с С.М. Новиковым и О.Г. Савичевым [6–9], а также сведения других организаций и авторов [10–17].

Основное условие обобщения информации из разных источников – отбор проб согласно требованиям [18] и определение гидрохимических показателей в аккредитованных лабораториях (в основном в подразделениях Росгидромета, в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ), ТПУ, АО «Томскгеомониторинг») по аттестованным и сопоставимым между собой методикам. Для получения общей характеристики химического состава вод использовались данные о pH, сумме  $\Sigma$  и собственно содержаниях главных ионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ), для оценки содержания органических веществ – концентрации веществ, идентифицируемых как «нефтепродукты», и косвенные показатели – перманганатная (PO – permanganate oxidation) и бихроматная (BO – bichromate oxidation) окисляемости, для оценки специфических условий – концентрации биогенных веществ (Si,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , фосфаты) и ряда металлов (Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg). Используемые методы анализа преимущественно: pH – потенциометрический; концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$ , PO и BO – титриметрический;  $\text{SO}_4^{2-}$  – турбидиметрический; Si,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , фосфаты, Fe – фотометрический, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра NexION 300D;  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  – ионная хроматография; Zn, Cu, Al – инверсионно-вольтамперометрический, атомно-абсорбционный, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой.

Последующая обработка заключалась в поиске и исключении экстремальных значений согласно [19], расчете средних арифметических значений  $A$  и погрешностей их определения по формуле  $\delta_A$ :

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;  $N$  – объем выборки.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Речная сеть рассматриваемой территории представлена рекой Обь (бассейн Карского моря) и ее притоками. Рассматриваемые реки: левобережные притоки р. Обь – Васюган с притоками (Чижалпа, Нюрюлька и другие), Большой Юган, Чая с притоками (Икса, Андарма, Бакчар), Шегарка; правобережные притоки р. Обь – Тым, Вах, Тром-Юган, Лямин и другие. Границы водоразделов данных притоков Оби расположены в сильно заболоченной зоне, что в значительной степени определяет гидрохимический облик этих рек. Малые водотоки извилисты, с малыми уклонами (падение 5–10 см на 1 км) и со слабо выраженными водоразделами. Долины рек слабо разработанные, неясно выраженные, ассиметричные; преобладающая ширина 4–6 км. Реки, пересекающие болота, имеют низкие топкие берега и часто сливаются с займищами и сорами. Поймы рек двухсторонние, пересеченные старицами и ложбинами, с наличием дугообразных грив высотой 3–4 м, между которыми расположены болота. Степень заболоченности рек достигает 35–55 %. Значительная часть поверхностных вод таежной зоны Западной Сибири сосредоточена в многочисленных водоемах, представленных в основном небольшими по объему и площади внутриболотными пойменными озерами. Их количество в целом возрастает от южной границы таежной зоны к северу по мере увеличения степени увлажнения территории.

Болота покрывают в основном водораздельные пространства и широкие террасы рек, образуя крупнейшие в мире болотные системы площадью до 50 тыс. км<sup>2</sup> (Васюганское болото и другие). Особенностью региона является распространение болот разного типа с преобладанием верховых (олиготрофных) грядово-мочажинных болот, достигших оптимального развития и занимающих почти сплошь водораздельные пространства и плоские террасы. Широко распространенные болотные микроландшафты – грядово-мочажинный и грядово-мочажинный-озерковый комплексы, занимающие центральные и склоновые участки болотных массивов. Мохово-лесные, лесные и моховые микроландшафты расположены по склонам и окраям болот. Долины рек в пределах рассматриваемой зоны, в частности долины реки Васюган, также сильно заболочены, однако здесь широкое распространение имеют мезотрофные (переходные) и эвтрофные (низинные) болота.

По химическому составу воды верховых и переходных болот в среднем характеризуются как пресные с очень малой минерализацией (по сумме главных ионов  $\Sigma$ ), гидрокарбонатные кальциевые, по pH – кислые. Воды низинных болот также пресные, но уже со средней (в ряде случаев – с повышенной) минерализацией, по ионному составу – в целом гидрокарбонатные кальциевые, по pH – слабокислые и нейтральные. Для вод всех исследованных болот характерно высокое содержание органического вещества (ОВ; по величине ПО 68–90 мгО/дм<sup>3</sup>), аммонийного азота (2–4 мг/дм<sup>3</sup>), общего железа (1,4–3,4 мг/дм<sup>3</sup>). Широ-

кое распространение болот разного типа определяет специфику химического состава речных и озерных вод исследуемого региона.

Озёрные воды исследуемого региона в среднем характеризуются как пресные с минерализацией от малой (чаще – для внутриводотных озёр) до средней, гидрокарбонатные кальциевые, по величине рН – от кислых до слабощелочных. Минерализация и рН внутриводотных озёр во многих случаях ниже соответствующих показателей воды рек, в водосборах которых они расположены, а минерализация пойменных озёр в межень в ряде случаев, напротив, может быть несколько выше. Закономерно отмечается достаточно высокое содержание ОБ и продуктов их трансформации (табл. 1, 2).

Воды рек исследуемого региона, принимающих болотный сток с болот разного типа трофности, в среднем характеризуются как пресные с малой и средней минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые (по классификации О.А. Алёкина [20]), по вели-

чине рН – от слабокислых (преимущественно воды малых и средних рек в весенний период) до слабощелочных (чаще – в летний период во второй половине), содержат большое количество органических веществ – от 20 до 50 мгО/дм<sup>3</sup> по величине ПО (табл. 1). Согласно карте гидрохимической зональности органического вещества, исследованные реки относятся к зоне повышенной окисляемости – от 15 до 20 мгО/дм<sup>3</sup>, что определяется высокой степенью заболоченности их водосборов [21]. Модуль годового стока органического вещества, выносимого реками этого региона, варьирует на уровне 3–10 т/км<sup>2</sup>, значительно превышая модуль среднемноголетнего стока ОБ рек России [22, 23]. В составе ОБ идентифицирован широкий перечень различных соединений, включая углеводороды, фенолы, карбоновые кислоты, хлорсодержащие вещества и др. В значительных количествах обнаружены и продукты трансформации ОБ (например, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), а также ряд металлов, особенно Fe.

**Таблица 1.** Средние арифметические значения (А) гидрохимических показателей рек и озёр на территории Томской области и погрешности их определения (δ<sub>А</sub>)

**Table 1.** Arithmetic means (A) of hydrochemical characteristics of rivers and lakes on the area of Tomsk region and errors of determination (δ<sub>A</sub>)

Водный объект/Water body	Показатель Indicator	рН, ед. рН unit	Σ	СГ	ПО/РО,	БО/ВО	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Fe	Cu
			мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>	мгО/дм <sup>3</sup> /mgO/dm <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>						
р. Васюган/the Vasyugan river	A	6,95	138,5	3,9	22,71	47,41	2,263	0,098	2,324	1,378	1,6
	δ <sub>A</sub>	0,05	9,0	0,3	1,42	3,26	0,706	0,038	0,487	0,141	0,3
р. Чижанка (приток р. Васюган) the Chizhanka river (tributary of the Vasyugan river)	A	7,55	318,69	6,51	20,87	44,63	1,460	0,033	0,707	1,400	9,3
	δ <sub>A</sub>	0,11	51,63	1,73	4,00	4,11	0,401	0,009	0,138	0,263	4,6
р. Нюролька (приток р. Васюган) the Nyuroлка river (tributary of the Vasyugan river)	A	7,25	183,93	2,41	20,19	–	1,204	0,017	1,018	1,495	1,4
	δ <sub>A</sub>	0,13	37,14	1,16	3,16	–	0,091	0,014	0,118	0,293	0,4
Прочие притоки р. Васюган other tributaries of the Vasyugan river	A	6,57	158,65	14,54	40,96	98,34	6,636	0,065	2,956	3,026	4,7
	δ <sub>A</sub>	0,10	11,13	3,32	5,69	7,64	1,401	0,007	0,248	0,165	1,1
р. Парабель/the Parabel river	A	6,80	224,97	2,50	18,98	50,70	1,784	0,003	1,870	0,827	10,6
	δ <sub>A</sub>	0,15	24,93	0,25	2,68	10,25	1,183	0,001	0,490	0,187	8,1
р. Чузик (приток р. Парабель) the Chuzik (tributary of the Parabel river)	A	7,57	284,31	3,05	21,39	34,65	0,153	0,027	0,518	0,680	0,2
	δ <sub>A</sub>	0,28	32,51	0,35	2,41	3,02	0,051	0,019	0,132	0,082	0,2
Левые притоки р. Обь от устья р. Васюган до г. Стрежевой Left tributaries of the Ob river from the mouth of the Vasyugan river to the Strezhovoy town	A	6,48	87,08	6,14	19,35	89,50	0,540	0,005	1,507	5,683	3,7
	δ <sub>A</sub>	0,34	15,80	1,48	13,85	18,08	0,420	0,002	0,518	3,359	1,9
Правые притоки р. Обь от устья р. Васюган до г. Стрежевой Right tributaries of the Ob river from the mouth of the Vasyugan river to the Strezhovoy town	A	6,32	122,43	12,71	35,80	57,91	2,757	0,365	1,725	2,374	2,7
	δ <sub>A</sub>	0,27	26,33	3,64	2,60	4,93	0,606	0,151	0,269	0,462	1,5
р. Чая/the Chaya river	A	7,64	403,99	9,19	20,27	53,80	2,997	0,078	1,287	1,140	1,7
	δ <sub>A</sub>	0,12	27,8	0,8	2,33	9,66	0,893	0,021	0,213	0,137	0,4
р. Гавриловка (приток р. Икса) the Gavrilovka river (tributary of the Iksa river)	A	6,44	204,3	4,5	80,17	152,20	1,186	0,009	3,520	12,074	7,5
	δ <sub>A</sub>	0,08	60,2	1,3	9,56	29,18	0,300	0,005	0,869	5,739	5,5
Озера южно- и среднетаежной подзон в Томской области Lakes of South and Middle taiga subzones in Tomsk region	A	5,04	54,4	4,9	15,47	40,94	0,840	0,007	0,881	1,146	3,8
	δ <sub>A</sub>	0,36	31,2	3,7	5,63	10,06	0,546	0,003	0,205	0,880	2,3
Антропогенные объекты/Anthropogenous objects											
Шламовый амбар/Oil-waste pond	A	7,99	7308,5	3874,4	62,70	207,77	4,958	0,026	1,595	19,277	7,2

**Таблица 2.** Средние арифметические значения ( $A$ ) гидрохимических показателей рек на территории Ханты-Мансийского автономного округа, болотных вод на территории Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа и погрешности их определения ( $\delta_A$ )

**Table 2.** Arithmetic means ( $A$ ) of hydrochemical characteristics of rivers on the area of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug, mire water on the area of Tomsk region and the Khanty-Mansi Autonomous Okrug, errors of their determination ( $\delta_A$ )

Водный объект/Water body	Показатель/Indicator	рН, ед. рН unit	$\Sigma$	Cl	PO, мгО/дм <sup>3</sup> mgO/dm <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Fe
			мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>			мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>
Реки правобережья р. Оби, принимающие сток с олиготрофных болот Rivers of the right bank of the Ob river which take water flow from the oligotrophic bogs								
р. Вах/the Vakh river	$A$	6,80	50	4,5	18,5	0,04	0,002	1,65
	$\delta_A$	0,09	4,3	0,32	0,97	0,01	0,001	0,12
р. Тром-Юган/the Trom-Yugan river	$A$	6,79	37	4,7	19,6	0,10	0,004	1,65
	$\delta_A$	0,08	2,3	0,43	1,34	0,03	0,002	0,24
р. Лямин/the Lyamin river	$A$	6,05	27	5,6	–	–	–	1,43
	$\delta_A$	0,06	1,5	0,54	–	–	–	0,18
Верховые болота без признаков явного антропогенного воздействия/Oligotrophic bogs with no obvious signs of anthropogenic impact								
Олиготрофный грядово-мочажинный комплекс, гряда Oligotrophic hollow-ridge complex, ridge	$A$	4,47	38,7	5,2	90,72	0,780	0,026	1,044
	$\delta_A$	0,25	9,8	1,8	7,39	0,218	0,007	0,160
Олиготрофный грядово-мочажинный комплекс, мочажина Oligotrophic hollow-ridge complex, hollow	$A$	4,90	23,4	2,5	80,77	0,631	0,015	1,607
	$\delta_A$	0,14	3,7	0,5	7,58	0,202	0,010	0,307
Олиготрофное сосново-сфагново-кустарничковое болото («грам») Oligotrophic pine-shrub-sphagnum bog («gram»)	$A$	4,47	38,7	4,8	93,20	1,479	0,057	1,881
	$\delta_A$	0,12	8,6	1,8	5,75	0,219	0,013	0,148
Переходные и низинные болота без признаков явного антропогенного воздействия Meso- and eutrophic swamps with no obvious signs of anthropogenic impact								
Переходное/Mesotrophic swamp	$A$	4,71	77,3	4,7	96,08	1,255	0,042	2,863
	$\delta_A$	0,20	18,5	1,0	10,46	0,329	0,015	0,805
Низинное/Eutrophic swamp	$A$	5,92	173,8	4,0	68,08	1,454	0,053	3,390
	$\delta_A$	0,18	37,9	0,7	12,79	0,343	0,027	0,783
Реки левобережья р. Оби, принимающие сток с низинных и верховых болот The rivers of a left bank of the Ob river which accept water flow from eutrophic and oligotrophic swamps								
р. Большой Юган/the Bolschoy Yugan river	$A$	6,90	105	4,9	21	0,15	0,01	1,42
	$\delta_A$	0,07	11	0,45	1,4	0,02	0,005	0,15

Содержание растворенного кислорода в зимнюю межень в водах многих малых рек (а в ряде случаев – средних и больших) снижается вплоть до уровня, при котором начинаются заморные явления. Основной закономерностью пространственно-временных изменений является увеличение общей минерализации воды в зимнюю межень на фоне увеличения подземной составляющей водного стока. Влияние болот разного типа на химический состав исследованных рек выражено наиболее отчетливо по таким важным показателям, как рН, общая минерализация и содержание органических веществ. Обобщение многолетних данных Росгидромета позволило выявить ряд отличительных особенностей рек, принимающих сток с верховых и низинных болот (табл.1, 2). Реки левобережья р. Оби (р. Васюган, р. Большой Юган) имеют более высокую минерализацию воды ( $\Sigma$  100–160 мг/дм<sup>3</sup>) и рН на уровне нейтральных вод (рН7,0–7,5) по сравнению с правобережными притоками реки Лямин, Вах, Тром Юган ( $\Sigma$  27–50 мг/дм<sup>3</sup>) при рН=6,6–6,9. Пониженная минерализация рек правобережья р. Оби обусловлена в основном более высокой интенсивностью водообмена и худшей дренированностью левобережной части Обского бассейна, что обеспечивает более высокую минерализацию подземной составляющей речного стока. Влияние притока болотных вод на состояние рек и озер в наибольшей степени сказывается на со-

держании ОВ, их соединений с некоторыми металлами и продуктов трансформации. Различия по геохимическим показателям болотных вод выявляются не только для верховых, переходных и низинных болот, но и для болот с разным соотношением лесных и топяных фитоценозов и геоморфологического положения, что, по сути, отражает общую зависимость химического состава болотных вод от времени и площади контакта вод с минеральными частицами.

Сопоставление среднесезонных содержаний ряда химических веществ в реках и болотах исследуемого региона с действующими нормативами предельно допустимых концентраций для вод рыбохозяйственного и хозяйственно питьевого водопользования свидетельствует о том, что не только в болотных, но и в речных водах эти показатели в большинстве случаев превышают ПДК (рисунок). Высокие фоновые содержания ряда химических веществ (ОВ по ХПК и ПО, аммонийного азота, общего железа, марганца, меди) в реках таежной зоны Западной Сибири, определяющихся влиянием болотного стока, ставят под вопрос применение общепринятых методов нормирования антропогенной нагрузки на основе требуемых стандартов предельно допустимых концентраций приоритетных загрязняющих веществ. В настоящее время для установления допустимой нагрузки на водотоки используется гидролого-

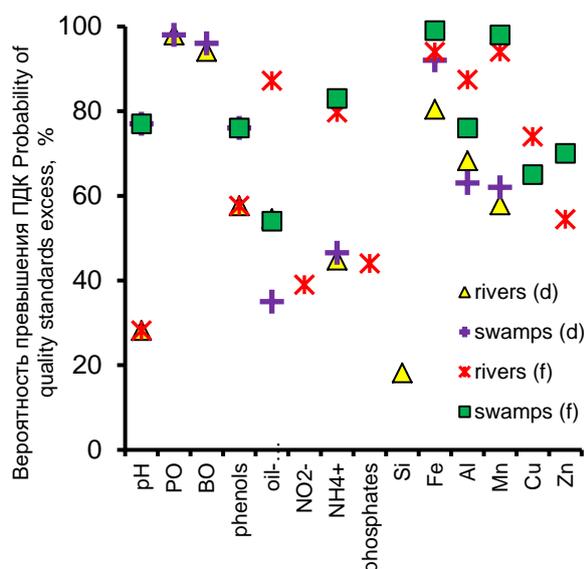
гидрохимический подход, основанный на теоретической зависимости концентрации загрязняющих веществ в контрольном створе ниже по течению от выпуска сбрасываемых в водоток сточных вод [23]:

$$C_p = C_\phi + \frac{C_{ст} - C_\phi}{n},$$

где  $C_{ст}$  – концентрация исследуемого вещества в сточных водах;  $C_\phi$  – концентрация вещества в фоновом створе (выше по течению от выпуска сточных вод);  $n$  – кратность разбавления сточных вод.

Контроль качества воды требует выполнения условия:  $C \leq \text{ПДК}$  хозяйственно-питьевого или рыбохозяйственного водопользования. Вместе с тем для отдельных регионов условия формирования природного гидрохимического режима таковы, что по ряду ингредиентов их содержание превышает нормативы ПДК. Так, в работе [24] в воде р. Кама содержание железа и марганца превышает рыбохозяйственные ПДК, что определяется особенностями почвенно-геохимического строения водосборной территории. Необходимость включения в общую схему нормирования антропогенной нагрузки экологических критериев, учитывающих региональную специфику химического состава вод, отмечается и другими авторами [25–27].

В соответствии с данными [3, 6–9, 11–13], речные и озерные воды таежной зоны Западной Сибири также не соответствуют принятым в России нормативам рыбохозяйственного и хозяйственно-питьевого водопользования по величине pH, перманганатной и бихроматной окисляемости, содержанию веществ, идентифицируемых как «нефтепродукты», фенолам, азоту аммонийному и нитритному, фосфатам, Si, Fe, Al, Mn, Cu, Zn (рисунок).



**Рисунок.** Вероятность превышения хозяйственно-питьевых (d) и рыбохозяйственных (f) нормативов качества в поверхностных водах таежной зоны Западной Сибири

**Figure.** Probability of drinking (d) and fishery (f) quality standards excess for surface waters of taiga zone of Western Siberia

Как видно из рисунка, степень превышения нормативов качества болотных и гидравлически связанных с ними речных и озерных вод в целом такова, что их использование в хозяйственно-питьевых и рыбохозяйственных целях становится невозможным. Соответственно, уже фоновое эколого-геохимическое состояние водных объектов заболоченных территорий таежной зоны Западной Сибири без признаков явного антропогенного воздействия (сброс сточных вод, осушение, строительство дорог, производственных объектов, мест размещения отходов) в основном соответствует категории «загрязненных» и «грязных» вод согласно [27].

В связи с этим оценка степени антропогенной нагрузки на водные объекты с такими высокими фоновыми содержаниями органического вещества, биогенных элементов, тяжелых металлов требует поиска наиболее индикативных показателей, имеющих низкие фоновые содержания, превышение которых позволяет оперативно выявлять уровень антропогенной нагрузки на исследованные водные объекты. Согласно анализу данных табл. 1, 2, к таким показателям, бесспорно, относятся ионы хлора (хлориды), фоновая концентрация которых в исследованных речных и озерных водах колеблется на уровне 4–16 мг/дм<sup>3</sup>, тогда как на антропогенных объектах (шламовых амбарах) она достигает 3800 мг/дм<sup>3</sup>. Кроме того, согласно данным [28], низкое содержание хлоридов вообще характерно для поверхностных вод таежной зоны Западной Сибири, так как его природное поступление в поверхностные воды обычно не превышает 15 мг/дм<sup>3</sup>. Именно поэтому наиболее характерными показателями загрязнения являются не повышенные концентрации нефтепродуктов, фенолов, NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Fe, Cu (в значительной степени – следствие болотных процессов), а хлоридные ионы. При этом антропогенное поступление хлоридов может быть связано либо с их использованием в процессах водоподготовки и водоотведения (дезинфекцией сточных вод), либо с поступлением в окружающую среду минерализованных подземных вод, используемых в системах поддержания пластового давления при добыче углеводородного сырья (табл. 1). Соответственно, при организации мониторинга в ряде случаев достаточно ограничиться несколькими характерными гидрохимическими показателями, среди которых обязательно должны присутствовать хлоридные ионы.

Необходимо также отметить, что ограничения по некоторым видам деятельности не всегда эффективны. Например, требование по обеспечению ПДК в болотных водах можно выполнить только при ликвидации болота как водного объекта, поскольку по определению болото характеризуется наличием торфа и, следовательно, высоким содержанием ОВ и продуктов его трансформации в болотных водах, а затем и в водах других водных объектов. С большой вероятностью подобное противоречие сохранится и при внедрении в практику подходов на основе использования наилучших доступных технологий. С учетом этого, возможно, целесообразно применение подхода на

основе соблюдения региональных фоновых концентраций, а также учета степени разбавления сточных вод в различные фазы водности – в периоды половодья и межени.

#### Заключение

Химический состав поверхностных вод в таежной зоне Западной Сибири в значительной степени определяется природными процессами заболачивания, вследствие чего наблюдается нарушение рыбохозяйственных и хозяйственно-питьевых нормативов качества по величине pH, содержанию  $\text{NH}_4^+$ , Fe, Al, Mn, фенолов, веществ, идентифицируемых как «нефтепродукты», а также рыбохозяйственных – по содержанию  $\text{NO}_2^-$ , фосфатов, Cu, Zn и хозяйственно-питьевых нормативов – по величине бихроматной и перманганатной окисляемости. Антропогенное влияние достаточно надежно выявляется по повышению содержания хлорид-иона (в пределах ПДК, но в 2–3 раза выше фоновых значений).

Болота и заболоченные территории, широко распространенные в этом регионе, вовлечены в хозяйственную деятельность и имеют важное значение как источники многих ресурсов (торф, дикорастущие растения и др.), играют особую роль в поддержании биологического разнообразия. Однако в настоящее время использование болот в Западной Сибири недо-

статочно регламентировано и научно обосновано [24–26]. Несмотря на правовой статус болот, определенный Водным кодексом Российской Федерации, до сих пор не разработана нормативная и методическая основа для придания законной силы использованию болот. Учитывая масштабность вовлечения их в хозяйственную деятельность, назрела острая необходимость научно-обоснованных предложений по разработке нормативов допустимого воздействия на болота и реки-водоприемники болотного стока. Одним из аспектов такой работы является выявление закономерностей формирования гидрохимического режима болот и рек с высокой степенью заболоченности водосборов в естественных условиях.

Определение региональных значений фоновых концентраций и допустимых значений кратности разбавления (для водохозяйственных участков) целесообразно поручить подразделениям Росгидромета, которые в настоящее время одновременно являются и основным источником информации, и согласующим органом при разработке и утверждении нормативов допустимых сбросов. Технически такие данные могут представлять региональные карты изолиний (для средних рек), однородных районов (для малых рек, болот и озер) или участков больших рек, действующие в течение нескольких лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охрана окружающей среды в территориальном Западно-Сибирском комплексе / В.А. Шишов, В.Ю. Шеметов, В.И. Рябченко, В.П. Парфенов. – М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности ВНИИОЭНГ, 1988. – 53 с.
2. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: МГУ, 1998. – 376 с.
3. Адам А.М. Оценка экологического состояния территории Западной Сибири в целях обеспечения экологической безопасности в контексте устойчивого природопользования // Охрана природы: сборник статей / под ред. А.Е. Березина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – С. 1–12.
4. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia / W. Bleuten, E. Lapshina, W. Ivens, V. Shinkarenko, E. Wiersma // *International Peat Journal*. – 1999. – № 9. – P. 73–82.
5. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. – С. 174–186.
6. Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob river basin / O.G. Savichev, A.K. Mazurov, I.I. Pipko, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // *Doklady Earth Sciences*. – 2016. – V. 466. – P. 1. – P. 47–51. DOI: 10.1134/S1028334X16010141.
7. Dynamics of dissolved inorganic carbon and CO<sub>2</sub> fluxes between the water and the atmosphere in the main channel of the Ob river / I.I. Pipko, S.P. Pugach, O.G. Savichev, I.A. Repina, N.E. Shakhova, Y.A. Moiseeva, K.V. Barskov, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // *Doklady Chemistry*. – 2019. – V. 484. – P. 2. – P. 52–57. DOI: 10.1134/S0012500819020101.
8. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // *Plant Ecol*. – 2007. – V. 193. – P. 131–145. DOI 10.1007/s11258-006-9253-x.
9. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. – СПб.: ВВМ, 2009. – 536 с.
10. Транспорт загрязняющих веществ по крупным рекам европейского Севера и Сибири / А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов, О.С. Решетняк, М.Ю. Кондакова // *Водные ресурсы*. – 2015. – Т. 42. – № 3. – С. 279–287. DOI: 10.7868/S0321059615010101.
11. Shotyuk W. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentrations, and metal enrichment factors // *Environmental Reviews*. – 1996. – V. 4. – P. 149–183.
12. Pokrovsky O.S., Karlsson J., Giesle R. Freeze-thaw cycles of Arctic thaw ponds remove colloidal metals and generate low-molecular-weight organic matter // *Biogeochemistry*. – 2018. – V. 137. – P. 321–336. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0421-6>.
13. Biogeochemistry of dissolved carbon, major, and trace elementary during spring flood periods on the Ob River / O.S. Pokrovsky, L.G. Kolesnichenko, R.M. Manasypov, L.S. Shirokova, J. Karlsson, S.N. Kirpotin // *Hydrological Processes*. – 2019. – P. 1–16. DOI: 10.1002/hyp.13424.
14. Zemtsov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob river basin: history, current state and problems of research // *International Journal of Environmental Studies*. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 386–396. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2015.1019299> (дата обращения 05.07.2019).
15. Benedini M., Tsakiris G. Water quality modelling for rivers and streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
16. Фоновые показатели эколого-геохимического состояния вод верховых болот в таежной зоне на территории Российской Федерации / Т.М. Потапова, М.Л. Марков, А.П. Носаль, О.Г. Савичев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 83–92.
17. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
18. Р 52.24.309-2004. Рекомендации. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши на сети Росгидромета. Дата введения 2006-01-01. Феде-

- ральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2005. – 85 с.
19. РД 52.24.622-2017. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов сбросов сточных вод. Дата введения 14.06.2017 г. – М.; Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГХИ, 2017. – 96 с.
  20. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
  21. Смирнов М.П., Тарасов М.Н. Гидрохимическая карта окисляемости речных вод Европейской части СССР // Гидрохимические материалы. – 1970. – Т. 54. – С. 3–32.
  22. Никаноров А.М. Региональная гидрохимия. – Ростов на Дону: Изд-во НОК, 2011. – 389 с.
  23. Никаноров А.М. Гидрохимия. – Л.: Гидрометеиздат, 2001. – 444 с.
  24. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А., Садохина Е.Л. Проблемы регламентации техногенных воздействий на водные объекты // Эколого-водохозяйственный вестник. – 1998. – Вып. 3. – С. 27–29.
  25. Черногаева Г.М., Кузьмич В.Н., Бердников С.В. Проблемы нормирования стока химических веществ с водосборной территории // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 3. – С. 75–82.
  26. Нормирование вредных воздействий на водные объекты в бассейне малой реки / А.Е. Косолапов, О.А. Клименко, Е.В. Полуэктов, В.Г. Дубинина // Водное хозяйство России. – 2001. – Т. 3. – № 2. – С. 135–158.
  27. ГОСТ 17.1.2.04-77. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1977. – 17 с.
  28. Посохов Е.В. Формирование хлоридных вод гидросферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 247 с.

Поступила 14.07.2019 г.

#### Информация об авторах

**Марков М.Л.**, кандидат географических наук, руководитель отдела экспериментальных гидрологических исследований и математического моделирования, Государственный гидрологический институт.

**Потапова Т.М.**, кандидат химических наук, доцент Института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет.

**Задонская О.В.**, старший научный сотрудник лаборатории озер и водохранилищ, Государственный гидрологический институт.

UDC 550.46

## REGIONAL FEATURES OF ECOLOGICAL GEOCHEMICAL CONDITION OF SURFACE WATER BODIES IN TAIGA ZONE OF WESTERN SIBERIA

Mikhail L. Markov<sup>1</sup>,  
2019mml@mail.com

Tatyana M. Potapova<sup>2</sup>,  
ptm2000@mail.ru

Olga V. Zadonskaya<sup>1</sup>,  
ov-zadon@yandex.ru

<sup>1</sup> State Hydrological Institute,  
23, 2<sup>nd</sup> line of Vasilyevsky island, Saint Petersburg, 199053, Russia.

<sup>1</sup> St.-Petersburg State University,  
7/9, Universitetskaya embankment, Saint Petersburg, 199034, Russia.

**Relevance.** Quantitative assessment of ecological and geochemical state of surface waters and their formation factors is one of the most important stages of water resources management which determines the effectiveness of measures for integrated use and protection of waters.

**The aim** of the research is the quantitative assessment of regional features of the current ecological and geochemical state of surface water bodies in the taiga zone of Western Siberia.

**Methods:** methods of water chemical composition researches (titrimetric, turbidimetric, photometric, ion chromatography, inversion-voltamperometric, atomic absorption, mass spectrometric with inductively coupled plasma); statistical methods.

**Results and conclusions.** The authors have considered regional features of ecological and geochemical state of surface water bodies in taiga zone of Western Siberia by the results of analysis of the materials of long-term hydrochemical observations of Roshydromet and other organizations. It is shown that chemical composition of surface waters in the region is largely determined by the natural wetland processes, resulting in an excess of fishery and drinking quality standards for the pH value, the content of  $\text{NH}_4^+$ , Fe, Al, Mn, phenols, substances identified as «petroleum products», as well as fishery standards – for the content of  $\text{NO}_2^-$ , phosphates, Cu, Zn and drinking – the value of bichromate and permanganate oxidability. It is established that anthropogenic influence is reliably detected by increasing the chloride ion content (within the maximum permissible concentrations, but 2–3 times higher than the background values). The authors developed the recommendations on hydrochemical monitoring. On the basis of regional background concentrations of pollutants and water discharge on the regime stations of Siberian rivers the degree of dilution of wastewater dropped into the rivers of strongly swampy watersheds can be determined. These calculations should be the basis for the approved standards of permissible impacts on the rivers of the taiga zone of Western Siberia.

### Key words:

River waters, lake waters, swamp waters, chemical composition, taiga zone, Western Siberia.

### REFERENCES

- Shishov V.A., Shemetov V.Yu., Ryabchenko V.I., Parfenov V.P. *Okhrana okruzhayushchey sredy v territorialnom Zapadno-Sibirskom komplekse* [Environmental protection in the territorial West Siberian complex]. Moscow, VNIOENG Publ., 1988. 53 p.
- Solntseva N.P. *Dobycha nefi i geokhimiya prirodnnykh landshaftov* [Oil production and geochemistry of natural landscapes]. Moscow, Moscow State University Press, 1998. 376 p.
- Adam A.M. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya territorii Zapadnoy Sibiri v tselyakh obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti v kontekste ustoychivogo prirodnopolzovaniya [Assessment of ecological state of the territory of Western Siberia in order to ensure environmental safety in the context of sustainable environmental management]. *Okhrana prirody* [Environmental protection]. Ed. by A.E. Berezin. Tomsk, NTL Press, 2005. pp. 1–12.
- Bleuten W., Lapshina E., Ivens W., Shinkarenko V., Wiersma E. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo-Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
- Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasyuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat layers of Great Vasyugan bog]. *Bolshoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan bog. Current state and development]. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk, IOA SB RAS Publ., 2002. pp. 174–186.
- Savichev O.G., Mazurov A.K., Pipko I.I., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob river basin. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, P. 1, pp. 47–51. DOI: 10.1134/S1028334X16010141.
- Pipko I.I., Pugach S.P., Savichev O.G., Repina I.A., Shakhova N.E., Moiseeva Y.A., Barskov K.V., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Dynamics of dissolved inorganic carbon and  $\text{CO}_2$  fluxes between the water and the atmosphere in the main channel of the Ob river. *Doklady Chemistry*, 2019, vol. 484, P. 2, pp. 52–57. DOI: 10/1134/S0012500819020101.
- Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecol.*, 2007, vol. 193, pp. 131–145. DOI 10.1007/s11258-006-9253-x.
- Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia]. Ed. by S.M. Novikov. St Petersburg, VVM Publ., 2009. 536 p.
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A., Reshetnyak O.S., Kondakova M.Yu. Transport of pollutants along the major rivers of the European North and Siberia]. *Water resources*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 279–287. DOI: 10.7868/S0321059615010101. In Rus.

11. Shotykh W. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentrations, and metal enrichment factors. *Environmental Reviews*, 1996, vol. 4, pp. 149–183.
12. Pokrovsky O.S., Karlsson J., Giesle R. Freeze-thaw cycles of Arctic thaw ponds remove colloidal metals and generate low-molecular-weight organic matter. *Biogeochemistry*, 2018, vol. 137, pp. 321–336. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0421-6>.
13. Pokrovsky O.S., Kolesnichenko L.G., Manasyrov R.M., Shirokova L.S., Karlsson J., Kirpotin S.N. Biogeochemistry of dissolved carbon, major, and trace elementary during spring flood periods on the Ob River. *Hydrological Processes*, 2019, pp. 1–16. DOI: 10.1002/hyp.13424.
14. Zemtsov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob river basin: history, current state and problems of research. *International Journal of Environmental Studies*, 2015, vol. 72, no. 3, pp. 386–396. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2015.1019299> (accessed 05 July 2019).
15. Benedini M., Tsakiris G. *Water quality modelling for rivers and streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
16. Potapova T.M., Markov M.L., Nosal A.P., Savichev O.G. Background parameters of the ecological and geochemical condition of waters of oligotrophic bogs in the taiga zone in the Russian federation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 83–92. In Rus.
17. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
18. *Rekomendatsii i organizatsiyai provedeniye rezhimnykh nablyudeniy za zagryazneniyem poverkhnostnykh vod sushi na seti Rosgidrometa* [Recommendations. Organizing and conducting routine monitoring of surface water pollution on the Roshydromet network]. Moscow, Meteo agentstvo Rosgidrometa Publ., 2005. 85 p.
19. RD52.24.622-2017 *Poryadok provedeniya raschetov fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vodnykh objektach* [Procedure for calculating the background concentrations of chemicals in the water of water bodies in order to establish standards for wastewater discharges]. Moscow, Rostov-na-Donu, Rosgidromet, FGBU «SCHD», 2017. 96 p.
20. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
21. Smirnov M.P., Tarasov M.N. *Gidrokhimicheskaya karta okisleniya rechnykh vod Evropeyskoy chasti SSSR* [Hydrochemical map of oxidation of river waters of the European part of the USSR]. *Gidrokhimicheskie materialy*, 1970, vol. 54, pp. 3–32.
22. Nikanorov A.M. *Regionalnaya gidrokhimiya* [Regional hydrochemistry]. Rostov on Don, NOK Press, 2011. 389 p.
23. Nikanorov A.M. *Gidrokhimiya* [Hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 2001. 444 p.
24. Lepikhin A.P., Miroshnichenko S.A., Sadokhina E.L. Problemy reglamentatsii tekhnogennykh vozdeystviy na vodnyye obekty [Problems of regulation of technogenic impacts on water bodies]. *Ekologo-vodokhozyaystvennyy vestnik*, 1998, vol. 3, pp. 27–29.
25. Chernogaeva G.M., Kuzmich V.N., Berdnikov S.V. Problemy normirovaniya stoka khimicheskikh veshchestv s vodosbornoy territorii [Problems of rationing chemicals from the catchment area]. *Meteorology and Hydrology*, 2003, no. 3, pp. 75–82. In Rus.
26. Kosolapov A.E., Klimenko O.A., Poluektov E.V., Dubinina V.G. Normirovanie vrednykh vozdeystviy na vodnyye obyekty v bassejny maloy reki [Rationing of harmful effects on water bodies in the basin of a small river]. *Vodnoyekozyaystvo Rossii*, 2001, vol. 3, no. 2, pp. 135–158.
27. GOST 17.1.2.04–77 *Pokazateli sostoyaniya i pravila taksatsii vodnykh obyektov* [SS 17.1.2.04–77 Status indicators and taxation rules for fishery water bodies]. Moscow, Goskomstandart, 1977. 17 p.
28. Posokhov E.V. *Formirovanie khloridnykh vod gidrosfery* [Formation of chloride waters of the hydrosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977. 247 p.

Received: 14 July 2019.

#### Information about the authors

**Mikhail L. Markov**, Cand. Sc., head of the department of experimental hydrological researches and mathematical modelling, State Hydrological Institute.

**Tatyana M. Potapova**, Cand. Sc., senior lecturer, St.-Petersburg State University.

**Olga V. Zadonskaya**, senior researcher, State Hydrological Institute.

УДК 549.01:550.4(571.54/.55)

## ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРАНА И ТОРИЯ В СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПИТЬЕВЫХ ВОД (РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН)

Фархутдинов Исхак Мансурович<sup>1</sup>,  
iskhakgeo@gmail.com

Соктоев Булат Ринчинович<sup>2</sup>,  
bulatsoktoev@tpu.ru

Рихванов Леонид Петрович<sup>2</sup>,  
rikhvanov@tpu.ru

Фархутдинов Анвар Мансурович<sup>1</sup>,  
anvarfarh@mail.ru

Злобина Анастасия Николаевна<sup>1,2</sup>,  
anastasiyazl@mail.ru

Исмагилов Рустем Айратович<sup>3,1</sup>,  
rustem\_ismagilov@bk.ru

Никонов Владимир Николаевич<sup>4</sup>,  
nikon-ufa@mail.ru

Белан Лариса Николаевна<sup>4</sup>,  
belan77767@mail.ru

<sup>1</sup> Башкирский государственный университет,  
Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

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

<sup>3</sup> Институт геологии УФИЦ РАН,  
Россия, 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2.

<sup>4</sup> Научно-исследовательский институт безопасности жизнедеятельности,  
Россия, 450005, г. Уфа, ул. 8 Марта, 12/1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью выявления источников поступления естественных радиоактивных элементов в питьевую воду, а также возможностью использования солевых отложений питьевых вод (накиси) в геохимических и экологических исследованиях. Наличие на территории Башкортостана различных геологических структур (горная область, предгорный прогиб, платформа), а также большое разнообразие горных пород различного возраста и состава (вулканогенные, интрузивные, осадочные, метаморфические) благоприятствует данным исследованиям и обуславливает большое разнообразие микроэлементного профиля местности.

**Цель:** оценка содержания и пространственного распределения радиоактивных элементов в солевых отложениях питьевых вод (накиси) на территории Республики Башкортостан.

**Объекты.** Проанализированы данные по содержанию U и Th в 467 пробах солевых отложений питьевых вод (накиси) из 267 населенных пунктов Республики Башкортостан. Пробы отобраны из различной посуды (эмалированные и электрические чайники, кастрюли, котлы, самовары), которая используется для кипячения воды из централизованных и индивидуальных (скважины, колодцы, ручьи) источников водоснабжения.

**Методы.** Для анализа содержания U и Th использовался метод инструментального нейтронно-активационного анализа на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т ТПУ. Обработка данных проводилась с использованием программных пакетов Statistica 8.0 и Microsoft Excel 2013. Построение карт пространственного распределения естественных радиоактивных элементов в солевых отложениях питьевых вод проведено с помощью программы ArcGIS 10.2 в модуле Geostatistical Analyst методом обратных расстояний.

**Результаты.** Полученные данные позволяют говорить о неравномерном распределении естественных радиоактивных элементов (U, Th) в солевых отложениях на территории Республики Башкортостан. Региональный фон концентрации U и Th отличается пониженными значениями. Вариации их содержания определяются воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Закономерности распределения U в пробах накиси хорошо согласуются с особенностями геологического строения территории. В пределах платформенной части распределение U является более равномерным по площади, чем в горной части республики, что отражает сравнительную однородность геологических и тектонических условий. По результатам картирования выделено четыре зоны повышенного содержания U в образцах солевых отложений: зауральская, уральская, западная и южная. В пространственном распределении Th не выявлено четкой корреляционной связи с особенностями геологического строения и металлогении территории. Выделены три зоны: северная, центральная и юго-восточная. Отмечены отрицательные аномалии содержания Th, территориально совпадающие с крупными горнодобывающими центрами. Показатель Th/U отношения характеризуется низким значением для всей территории Башкортостана – 0,002. При этом положительные аномалии данного показателя зафиксированы в северной и юго-восточной частях республики, где они обусловлены, преимущественно, геологической составляющей.

### Ключевые слова:

Уран, торий, антропогенные карбонаты, геоэкология, торий-урановое отношение, Республика Башкортостан, Южный Урал, геохимия, радиоактивные элементы, питьевые воды.

## Введение

Карбонатные отложения занимают около 15 % поверхности суши, существенная часть осадочного чехла платформ и морских осадков представлена данными породами [1, 2]. Исследование различных геологических процессов (палеосейсмических и палеоклиматических событий, тектонической активизации и др.) в науках о Земле ведется в том числе за счет изучения осадочных карбонатных образований (травертины, гейзериты, сталактиты, сталагмиты) [3–9 и др.].

Содержание U и Th в верхней части континентальной коры по современным оценкам колеблется в следующих пределах: Th – 8,6–10,7 мг/кг, U – 1,5–2,8 мг/кг [10, 11]. Средний уровень данных элементов в осадочных карбонатных породах составляет 4,3 мг/кг для Th и 2,2 мг/кг для U [11]. Вариации содержания Th и U, а также их отношения (Th/U, U/Th) часто являются предметом исследований для выявления источников поступления, а также смены геохимических обстановок вследствие различных геохимических свойств данных химических элементов (прежде всего, из-за поливалентности U) [12–16].

Карбонатные отложения также широко распространены и в антропогенных условиях, например в системах транспортировки и распределения воды [17, 18 и др.]. Также они накапливаются в бытовой теплообменной аппаратуре. В этом случае образование карбонатов (накипи) связано с достижением состояния пересыщения по  $\text{CaCO}_3$  по мере увеличения температуры во время кипячения воды в электрическом чайнике (кастрюле или котле).

Изучение элементного (в том числе Th и U) состава таких отложений проводится на кафедре геоэкологии и геохимии (в настоящее время – отделение геоэкологии) Томского политехнического университета (ТПУ), начиная с 1990-х гг. [19, 20 и др.]. За этот период отобрано более 1000 проб на территории Томской, Кемеровской, Иркутской, Челябинской областей, Республик Бурятия и Башкортостан, Павлодарской области Казахстана. Полученные данные по содержанию Th и U в данных отложениях свидетельствуют об их неравномерном распределении. Формирование радиогеохимической специализации данных образований связано с влиянием как природного, так и техногенного факторов. Вариации содержания радиоактивных элементов в накипи позволяют использовать их в качестве косвенного поискового критерия, в частности, на урановое оруденение. Нарушение фонового показателя Th/U является индикаторным в антропогенно нагруженных районах, особенно в зонах функционирования объектов ядерно-топливного цикла (места проведения подземных ядерных взрывов, химические комбинаты по обогащению урана и др.) [21].

Территория Республики Башкортостан (РБ) является уникальным полигоном для геохимических исследований в связи с наличием разнообразных по составу и происхождению пород и различных нефте- и горнодобывающих, а также перерабатывающих предприятий.

## Материалы и методы исследования

*Территория исследования.* Исследование было проведено на территории РБ – региона Европейской части России общей площадью 143600 км<sup>2</sup>. Республика расположена в зоне сочленения двух крупных геологических структур. Восточная часть РБ относится к Южному Уралу, западная часть расположена на восточной окраине Восточно-Европейской платформы. Между Южным Уралом и Восточно-Европейской платформой выделяется переходная зона в виде Предуральского краевого прогиба. В горной части РБ выделяют четыре основные тектонические структуры: Башкирский мегантиклинорий, Зилаирский синклинорий, антиклинорий Уралтау, Магнитогорский синклинорий (рис. 1). Сложное геологическое строение и металлогения определяют вариации содержания химических элементов, в том числе радиоактивных. На территории республики имеется множество рудопроявлений урановой и ториевой минерализации, где уровень радиационного фона приближается к предельно допустимым значениям [22].

Наряду с природными факторами существенен вклад антропогенных: на равнинной части развита нефтегазодобывающая (запад, северо-запад, центральная часть РБ), химическая и нефтехимическая (гг. Стерлитамак, Уфа, Салават, Мелеуз, Туймазы, Октябрьский) отрасли, добыча бурого угля (юг, г. Кумертау, Южно-Уральский буругольный бассейн). В горной и зауральской частях сосредоточены объекты горнодобывающей промышленности (добыча цветных металлов, железа, золота) (рис. 1). Вокруг предприятий данных отраслей имеются очаги кризисной и катастрофической геоэкологической обстановки [23–25 и др.].

*Отбор проб.* Проанализированы данные по содержанию Th и U в 467 пробах солевых отложений питьевых вод из 267 населенных пунктов РБ. Пробы отбирались в соответствии с рекомендациями [26] и с учетом опыта предыдущих исследований. Отбор проб проводился из различной посуды (эмалированные и электрические чайники, кастрюли, котлы, самовары), которая используется для кипячения воды, как из централизованных, так и индивидуальных (скважины, колодцы, ручьи) источников водоснабжения.

*Аналитические методы.* Анализ содержания Th и U проводился методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) с использованием исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т ТПУ (ядерно-геохимическая лаборатория Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология», аттестат аккредитации № RA.RU.21AB27 от 08.04.2015 г., аналитики – А.Ф. Судыко, Л.Ф. Богутская). Данный метод эффективен для определения радиоактивных элементов [27, 28].

*Обработка результатов.* Для обработки данных применяли программные пакеты Statistica 8.0 и Microsoft Excel 2013. При статистической обработке полученных результатов определялись: среднее арифметическое значение, стандартная ошибка, сред-

нее геометрическое значение, медиана, мода, минимальное и максимальные значения, стандартное отклонение, коэффициент вариации, асимметрия, эксцесс и их стандартные ошибки. В расчет средних содержаний не были включены «ураганные пробы», однако данные пробы показаны в разбросах частных значений. Тесты Лиллиефорса, Колмогорова–Смирнова и Хи-квадрат были применены для проверки на нормальность распределения элементов в выборке. Накипь из воды озера Байкал, полученная авторами (содержание Th – 0,384 мг/кг, U – 4,51 мг/кг),

и кларк осадочных карбонатных пород [11] были использованы как фоновые показатели для расчета коэффициентов концентрации и определения геохимической специализации.

Построение карт пространственного распределения естественных радиоактивных элементов проведено с помощью программы ArcGIS 10.2 в модуле Geostatistical Analyst методом обратных расстояний. Шаг в классификации выбран автоматический для каждой карты согласно методу классификации «Геометрический интервал».

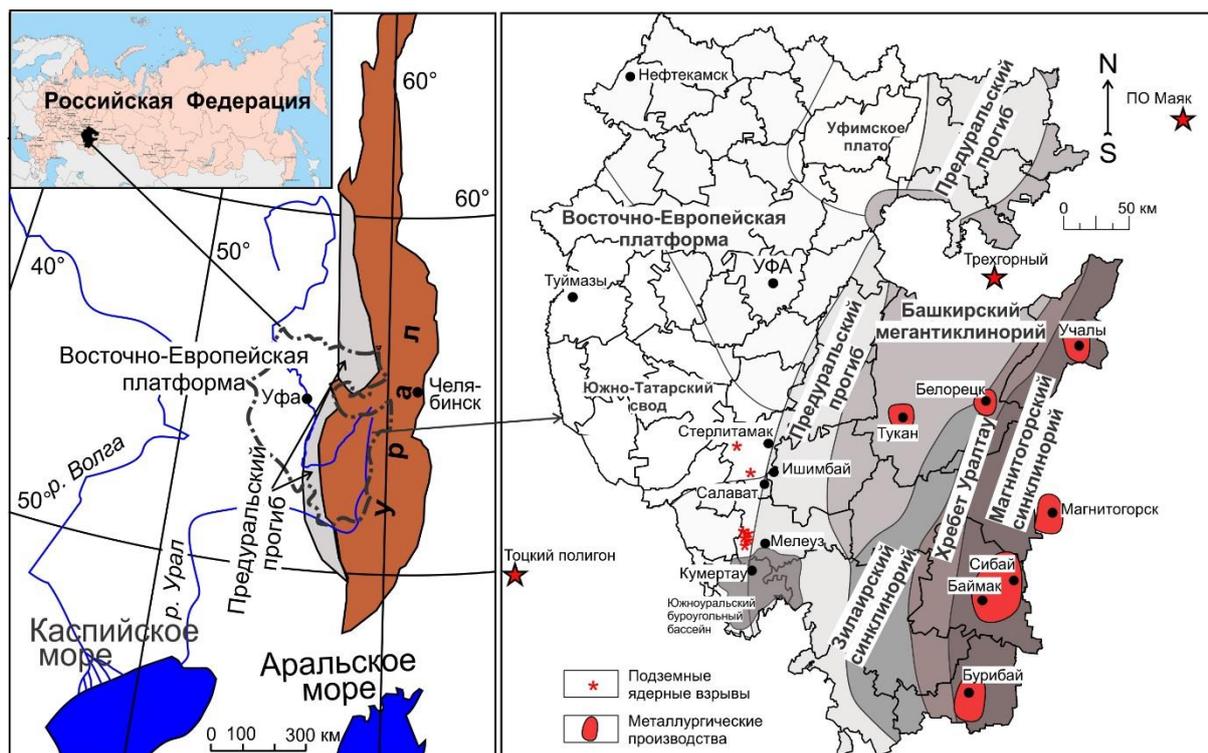


Рис. 1. Обзорная геоэкологическая карта территории исследования  
 Fig. 1. Overview geocological map of the study area

### Результаты и их обсуждение

Обработанные аналитические данные представлены в таблице. Ввиду того, что распределение Th и U отличается от нормального, в качестве среднего значения выбрана медиана.

При сравнении с фоновыми показателями и данными по другим регионам (Томская, Кемеровская, Иркутская, Челябинская области, Республики Бурятия, Алтай; Павлодарская область Казахстана) обнаружено, что изучаемые отложения на территории РБ характеризуются пониженными содержаниями естественных радиоактивных элементов: средняя концентрация Th минимальна среди всех изученных регионов, среднее содержание U ниже только на территории Томской области (1,9 мг/кг). По пониженному значению Th/U отношения (0,002) территория республики выделяется среди всех изученных нами регионов [21].

Таблица. Статистические параметры содержания Th и U (мг/кг) в солевых отложениях питьевых вод на территории Республики Башкортостан

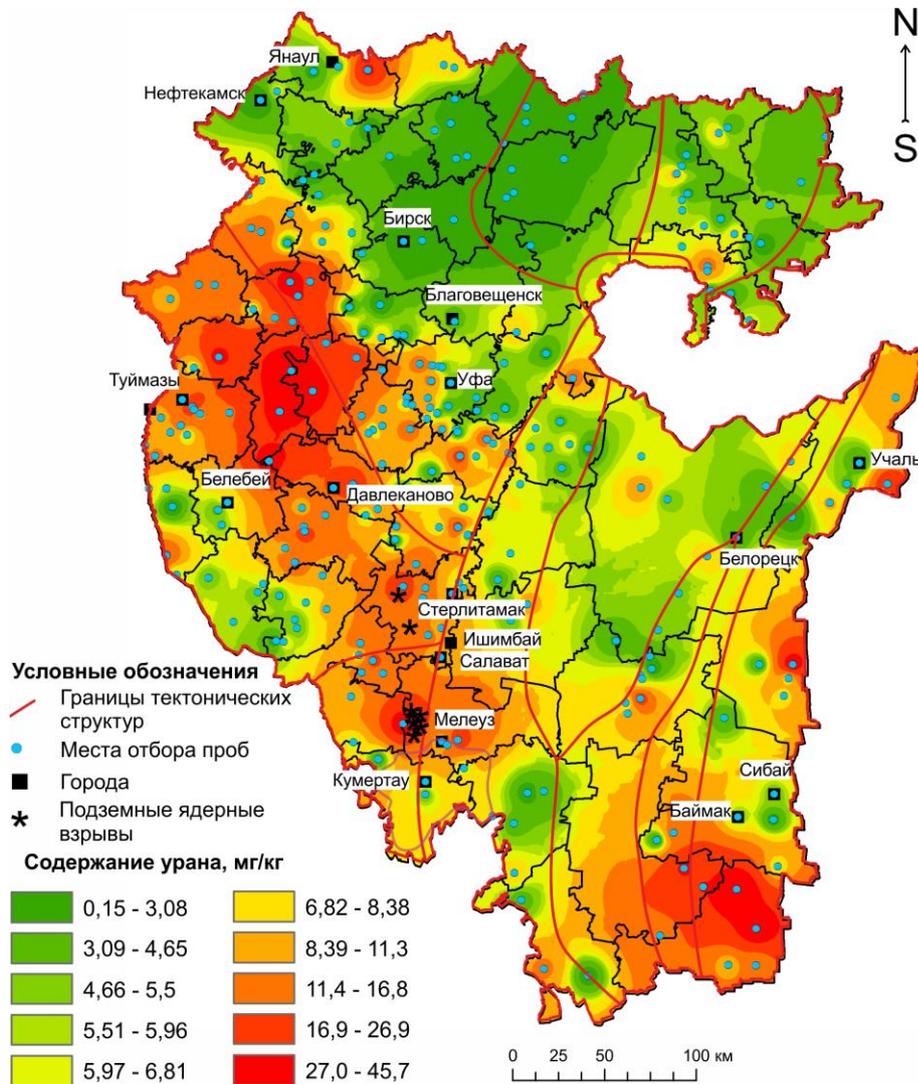
Table. Statistical parameters of Th and U (mg/kg) content in salt sediments (scale) on the territory of the Republic of Bashkortostan

Статистические параметры Statistical parameters	Th	U
Среднее арифметическое/Arithmetic mean	0,03	8,5
Стандартная ошибка/Standard error	0,004	0,4
Среднее геометрическое/Geometric mean	0,01	4,7
Медиана/Median	0,01	5,3
Мода/Mode	0,003	–
Минимум–максимум/Minimum–maximum	0,0002–3,27	0,01–61,0
Стандартное отклонение Standard deviation	0,08	9,2
Коэффициент вариации Coefficient of variation	449	112
Асимметрия/Skewness	5,6	2,0
Эксцесс/Kurtosis	36,6	4,2

Примечание/Note: «–» – значение не определено/value is not defined.

Пространственное распределение как Th и U, так и Th/U в солевых отложениях питьевых вод на территории РБ носит неравномерный характер. Сразу следует отметить хорошее согласование распределения U с особенностями геологического строения и в ряде случаев с техногенными источниками, в то время как для Th такой четкой корреляционной связи не выявлено.

*Пространственное распределение U.* По результатам построения карты пространственного распределения U в пробах накипи нами выделены четыре зоны со сравнительно повышенным содержанием данного химического элемента: в пределах складчатой части – зауральская, уральская, в пределах платформенной части – западная и южная (рис. 2).



**Рис. 2.** Карта пространственного распределения урана в солевых отложениях питьевых вод (накипи) на территории Республики Башкортостан. Метод классификации «геометрический интервал»

**Fig. 2.** Map of uranium spatial distribution in salt sediments (scale) on the territory of the Republic of Bashkortostan. Classification method «geometric interval»

**Зауральская зона.** Повышенное содержание U (от 22 до 45 мг/кг) выявлено в Абзелиловском, Зилаирском, Учалинском и Хайбуллинском районах (рис. 2). Максимальные концентрации (до 45 мг/кг) приурочены в основном к площади развития метаморфических сланцев максютювского комплекса антиклинория Уралтау, к девонским вулканогенно-осадочным толщам запада Магнитогорской мегазоны (синклинория) (ирендыкская свита – базальты, андезибазальты, риодациты, кремнисто-глинистые сланцы, улутауская свита – вулканомиктовые песчаники, туффиты, кремнистые сланцы, андезибазальты, андезиты, риодациты и их туфы).

В южной части Башкирского Зауралья обширное поле повышенных концентраций U совпадает с Таналыкской депрессией, на поверхности частично перекрытой юрскими терригенными отложениями. Ореолы на востоке Абзелиловского района (до 36,2 мг/кг) приурочены к известнякам кизильской свиты ( $C_1$ – $C_2$ ), в которых с зонами ожелезнения и окремнения связаны урановые аномалии [22]. На территории Учалинского района аномалия связана с выходами лейкогранитов ахуново-карагайского комплекса ( $C_2$ ). В целом полученные данные по зауральской зоне хорошо согласуются с данными опробования донных отложений [29].

**Уральская зона.** Аномалии повышенных содержаний U (от 10 до 23 мг/кг) выявлены в Белорецком, Бурзянском, Дуванском и Салаватском районах. Для данной зоны характерно вероятное совместное воздействие комплексов горных пород и тектонического фактора, например, в Бурзянском районе, где ореол приурочен к битуминозным известнякам ( $D_2$ ) с надвиговой дислокацией (Зилаирский синклиорий). Согласно шарьяжно-надвиговой теории тектонические дислокации являются одним из основных факторов, повышающих мобильность элементов в горных породах [30, 31].

В Башкирском мегантиклинории наблюдается приуроченность высоких концентраций U к глауконитовым сланцам и алевролитам инзерской свиты ( $RF_3$ ). В качестве дополнительных источников поступления данного химического элемента могут выступать месторождения бурых железняков и черносланцевые толщи рифейского возраста, с которыми сопряжены повышенные концентрации U (Ra) и Rn в подземных водах и высокая активность Rn в почвенном воздухе [22].

Для населенных пунктов, расположенных в пределах Предуральского краевого прогиба (например, Дуванский район), аномалии U связаны с фосфатизированной кровлей артинско-сакмарских известняковых рифовых массивов, в которых ранее отмечены содержания U – 0,01–0,04 %, мощность экспозиционной дозы (МЭД) – до 300 мкР/ч (Ярославская, Митрофановская и другие аномалии). Необходимо отметить аномалии U, которые выявлены в зоне сочленения складчатого Урала и Предуральского прогиба (населенные пункты Янгантау, Комсомол Салаватского района), где на поверхность изливаются многочисленные радоновые и сероводородные источники, в том числе термальный источник Янган-Тау и источник Кургазак. В данном случае, вероятно, тектонический фактор сочетается с геохимическим, обусловленным широким развитием битуминозных пород (содержание U – до 0,02 %) [22].

**Западная зона.** По сравнению с горно-складчатой частью РБ пространственное распределение U в пределах юго-восточной части Восточно-Европейской платформы характеризуется более равномерным распределением, что обусловлено относительной однородностью геологических и тектонических обстановок. В то же время в западной зоне нами выявлена зона, генезис которой имеет природно-техногенный характер: в геологическом отношении она соответствует Шаранскому и Туймазинскому выступам кристаллического гранито-гнейсового фундамента и их восточным склонам (глубины залегания – от 2,5 до 6 км), а также областям распространения пермских красноцветных толщ уфимского яруса ( $P_1$ ). Данный район одновременно является центром нефтегазодобывающей промышленности РБ. Интенсивное отложение радиоактивных осадков возможно на установках подготовки нефти и в технологическом оборудовании (МЭД – до 3000 мкР/ч) [32]. Обращает также на себя внимание пространственная сопряженность

данной зоны накопления урана с площадью развития медистых песчаников гидрогенного генезиса в пермских красноцветных толщах [33, 34].

**Южная зона.** В пределах данной зоны повышенные концентрации U отмечены в пробах из населенных пунктов Кугарчинского, Куяргазинского и Мелеузовского районов. В этом случае мы также предполагаем природно-техногенный генезис, связанный, прежде всего, с разработкой месторождений Южно-Уральского бурогоугольного бассейна. Для углей характерны высокие адсорбционные свойства касательно широкого спектра химических элементов, в том числе и радиоактивных [35–39]. Для углей Южно-Уральского бурогоугольного бассейна также известна повышенная радиоактивность: на Ушкатлинском, Ново-Казанском, Маячном месторождениях содержание U в угле достигает 0,1 %, в золе – 1 % [22].

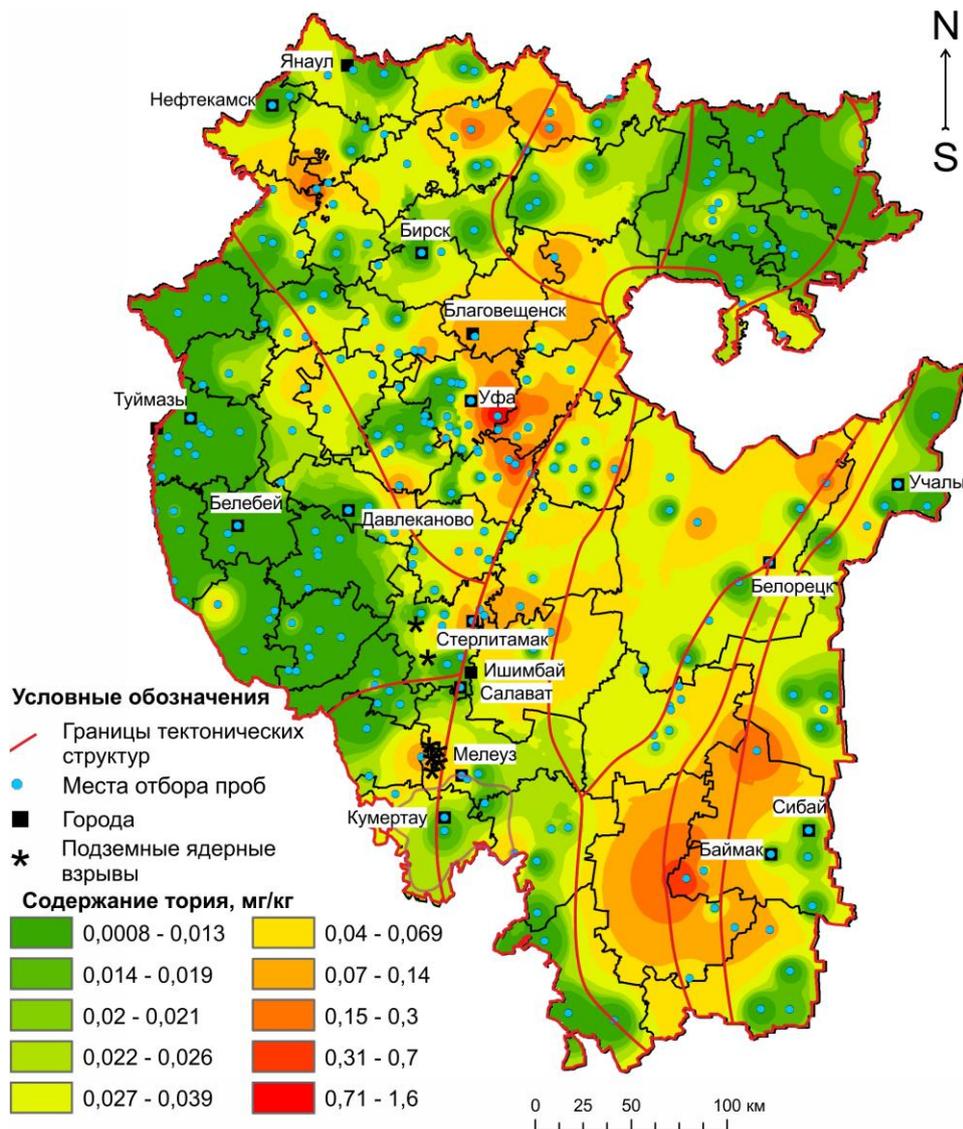
К дополнительным антропогенным факторам, вероятно, следует отнести подземные ядерные взрывы, которые были проведены в данной части РБ с 1965 по 1984 гг. для создания подземных хранилищ захоронения промышленных отходов (район г. Стерлитамак, г. Салават) и интенсификации добычи углеводородов (район г. Мелеуз, Грачевское месторождение). Замеры радиационного фона показывают наличие аномалии – до 250 мкР/ч [40]. Повышенные содержания U в изучаемых нами отложениях хорошо согласуются с данными по почвам в этом районе [24]. Однако данный вопрос требует дальнейших исследований, прежде всего, изучения изотопных отношений для более точного определения источника U.

Из отрицательных аномалий пространственного распределения U следует отметить территорию, приуроченную к Уфимскому плато, сложенному преимущественно известняками, а также зону наиболее крупного Арланского месторождения нефти, где причиной низкого уровня U может являться погружение кристаллического фундамента в Камско-Бельское авлакогене на глубину более 10 км.

**Пространственное распределение Th.** Как уже ранее упоминалось, в пространственном распределении Th не выявлено четкой корреляционной связи с особенностями геологического строения и металлогении территории РБ (рис. 3).

По результатам исследования выявлены ореолы максимальных концентраций Th, приуроченные к центральной (Благовещенский, Иглинский, Нуримановский, Уфимский районы), северной (Аскинский, Балтачевский, Краснокамский районы) и юго-восточной (Абзелиловский, Баймакский районы) части республики.

Ореол повышенного содержания Th в юго-восточной части РБ может быть связан с развитием углистых, хлорит-актинолитовых сланцев суванякского комплекса антиклинория Уралтау. В центральной части одним из возможных источников поступления Th могут являться углистые сланцы ( $C_3$ ) и связанные с ними элювиально-делювиальные фосфатизированные глины, в которых отмечены содержания Th до 0,1 % [22].



**Рис. 3.** Карта пространственного распределения тория в солевых отложениях питьевых вод (накипи) на территории Республики Башкортостан. Метод классификации «геометрический интервал»

**Fig. 3.** Map of thorium spatial distribution in salt sediments (scale) on the territory of the Republic of Bashkortostan. Classification method «geometric interval»

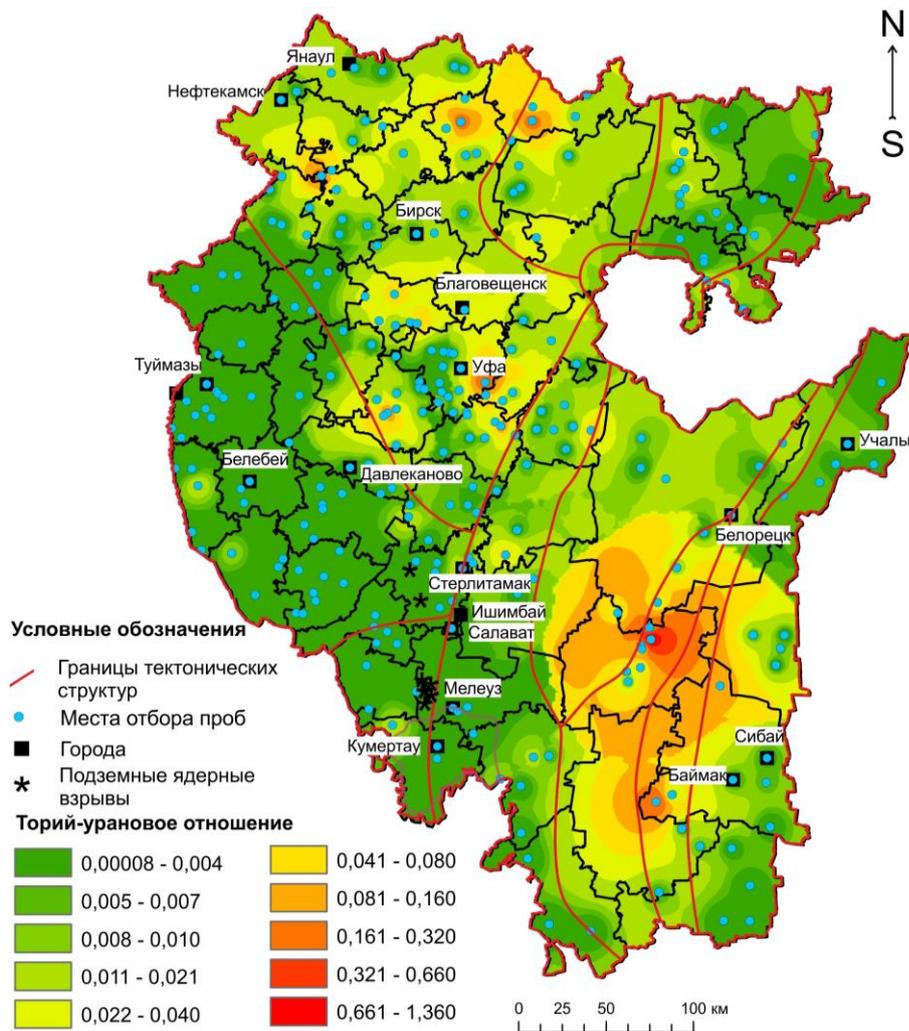
Пониженными содержаниями Th в солевых отложениях отличается западная и северо-восточная части республики. Из интересных моментов следует отметить отрицательные аномалии, выявленные в районах расположения крупных горнодобывающих (гг. Баймак, Белорецк, Кумертау, Сибай, Учалы), нефтедобывающих (гг. Нефтекамск, Туймазы) и нефтехимических (гг. Ишимбай, Салават) центров РБ.

**Пространственное распределение Th/U отношения.** Th/U отношение в пределах республики в солевых отложениях питьевых вод меняется в широких интервалах: от 0,00008 до 1,36 (рис. 4). Несмотря на разброс значений в пять порядков, пространственное распределение данного показателя имеет преимущественно однородный характер в солевых отложениях питьевых вод на территории РБ. Большая часть территории региона характеризуется значениями Th/U отношения в изучаемых отложениях ниже 0,02. Минимальные значения данного показателя отмечаются в платформен-

ной части республики. Ореолы повышенных значений Th/U отношения приурочены к Зилаирскому синклинорию и антиклинорию Уралтау – в восточной части, и к Уфимскому плато – в северной части республики.

#### Заключение

Таким образом, полученные данные позволяют говорить о неравномерном распределении естественных радиоактивных элементов (Th, U) в солевых отложениях питьевых вод (накипи) на территории Республики Башкортостан. Среднее содержание Th (0,01 мг/кг) и U (5,3 мг/кг) в накипи на территории РБ характеризуется как низкое по сравнению с пробами из других изученных регионов – Томской, Кемеровской, Иркутской, Челябинской областей, Республик Бурятия, Алтай (Россия); Павлодарской области (Казахстан). Вариации их содержания в изучаемых образованиях определяются воздействием природных и антропогенных факторов.



**Рис. 4.** Карта пространственного распределения торий-уранового отношения в солевых отложениях (накипи) на территории Республики Башкортостан. Метод классификации «геометрический интервал» с округлением до тысячных

**Fig. 4.** Map of thorium-uranium ratio spatial distribution in salt sediments (scale) on the territory of the Republic of Bashkortostan. The classification method is the «geometric interval» rounded-off to thousandths

Закономерности распределения U в пробах накипи хорошо согласуются с особенностями геологического строения территории. При этом в отдельных случаях, вероятно, на природный фактор накладывается и техногенный. В пределах платформенной части распределение U является более равномерным по площади, чем в горной части республики, что отражает сравнительную однородность геологических и тектонических условий. По результатам картирования выделено четыре зоны повышенного содержания U в образцах солевых карбонатных отложений: зауральская, уральская, западная и южная.

В платформенной части аномальная зона U совпадает с площадью добычи и переработки нефти, а также с территорией развития медистых песчаников. Это наводит на мысль о связи аномалий U с природной и техногенной миграцией углеводородов, а также с гидрогенным рудообразованием в пермских красноцветях. Южная аномальная зона в Предуралье приурочена к площади развития и разработки миоценовых бурых углей. В Башкирском Зауралье аномалии связаны в

основном с девонскими и карбоновыми вулканогенно-осадочными, карбонатными, интрузивными формациями, а также юрским чехлом терригенных морских отложений.

В пространственном распределении Th не выявлено четкой корреляционной связи с особенностями геологического строения и металлогении территории. Выделены три зоны повышенных содержаний данного элемента в солевых отложениях питьевых вод: северная, центральная и юго-восточная.

Показатель Th/U отношения также характеризуется низким значением для всей территории РБ – 0,002. При этом положительные аномалии данного показателя зафиксированы в северной и юго-восточной частях республики, где они обусловлены, преимущественно, геологической составляющей.

Научные исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карбонаты: минералогия и химия / пер. с англ. / под ред. Р.Дж. Ридера. – М.: Мир, 1987. – 496 с.
2. Morse J.W., Arvidson R.S., Lutge A. Calcium carbonate formation and dissolution // *Chemical Reviews*. – 2007. – V. 107. – P. 342–381.
3. Pentecost A. *Travertine*. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – 445 p.
4. Fairchild I.J., Treble P.C. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change // *Quaternary Science Reviews*. – 2009. – V. 28. – 449–468.
5. Tanner L.H. Continental carbonates as indicators of paleoclimate // *Developments in Sedimentology*. – 2010. – V. 62. – P. 179–214.
6. Geochemistry of limestones deposited in various plate tectonic settings / K.-J. Zhang, Q.-H. Li, L.-L. Yan, L. Zeng, L. Lu, Y.-X. Zhang, J. Hui, X. Jin, X.-C. Tang // *Earth-Science Reviews*. – 2017. – V. 167. – P. 27–46.
7. Mineralogical-geochemical features of travertines of the modern continental hydrotherms: A G-1 well, Tunka depression, Baikal rift zone / B.R. Soktoev, L.P. Rikhvanov, S.S. Ilenok, N.V. Baranovskaya, T.T. Taisaev // *Geology of Ore Deposits*. – 2015. – V. 57. – № 4. – P. 331–347.
8. Origins of elements building travertine and tufa: New perspectives provided by isotopic and geochemical tracers / P.-A. Teboul, C. Durllet, E.C. Gaucher, A. Virgone, J.-P. Girard, J. Curie, B. Lopez, G.F. Camoin // *Sedimentary Geology*. – 2016. – V. 334. – P. 97–114.
9. Global travertine deposition modulated by oscillations in climate / J.W. Ricketts, L. Ma, A.E. Wagler, V.H. Garcia // *Journal of Quaternary Science*. – 2019. URL: <https://doi.org/10.1002/jqs.3144> (дата обращения: 10.11.2019).
10. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. – 2014. – V. 4. – P. 1–51. URL: [https://www.researchgate.net/publication/234288836\\_Composition\\_of\\_the\\_Continental\\_Crust\\_Treatise\\_Geochem\\_31-64](https://www.researchgate.net/publication/234288836_Composition_of_the_Continental_Crust_Treatise_Geochem_31-64) (дата обращения: 10.11.2019).
11. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 382 с.
12. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Наука, 1974. – 231 с.
13. Евсеева Л.С., Перельман А.И., Иванов К.Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза. – М.: Атомиздат, 1974. – 278 с.
14. Allègre C.J., Dupré B., Lewin E. Thorium/uranium ratio of the Earth // *Chemical Geology*. – 1986. – V. 56. – № 3–4. – P. 219–227.
15. Earth's chondritic Th/U: negligible fractionation during accretion, core formation, and crust-mantle differentiation / S.A. Wipperfurth, M. Guo, O. Šrámek, W.F. McDonough // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2018. – V. 498. – P. 196–202.
16. Global atmospheric oxygen variations recorded by Th/U systematics of igneous rocks / H. Liu, R.E. Zartman, T.R. Ireland, W. Sun // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2019. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1902833116> (дата обращения: 10.11.2019).
17. Oilfield scale formation and chemical removal: a review / M.S. Kamal, I. Hussein, M. Mahmoud, A.S. Sultan, M.A.S. Saad // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 171. – P. 127–139.
18. A 21<sup>st</sup>-century perspective on calcium carbonate formation in potable water systems / C.S. Richards, F. Wang, W.C. Becker, M.A. Edwards // *Environmental Engineering Science*. – 2018. – V. 35. – Iss. 3. – P. 143–158.
19. Geochemical specialization of limescale of water sources illustrated by two regions in Siberia / A.E. Taphaeva, T.T. Taisaev, L.P. Rikhvanov, E.G. Yazikov, N.V. Baranovskaya // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2010. – V. 3. – № 4. – P. 498–507.
20. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Matveenko I.A. Mineralogical and geochemical characteristics of drinking water salt deposits // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27. – Iss. 1. – Article 012042.
21. Естественные радиоактивные элементы (Th, U) в солевых отложениях природных пресных вод / Б.Р. Соктоев, Л.П. Рихванов, Ш.Ж. Арынова, Н.В. Барановская // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции*. – Томск: STT, 2016. – С. 599–603.
22. Никонов В.Н. Природная и техногенная радиоактивность Республики Башкортостан // *Уральский экологический вестник*. – 2012. – № 2 (31). – С. 23–30.
23. Белан Л.Н. Геоэкологические основы природно-техногенных экосистем горнорудных районов Башкортостана: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М.: Изд-во ВИМС, 2007. – 50 с.
24. Асылбаев И.Г. Оценка геохимического состояния почв Южного Урала: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Уфа: Изд-во БашГАУ, 2016. – 44 с.
25. Orekunova M.G., Somov V.V., Papayan E.E. Soil contamination in the impact zone of mining enterprises in the Bashkir Transural region // *Eurasian Soil Science*. – 2017. – V. 50. – P. 732–745.
26. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды: пат. 2298212 Рос. Федерация. № 2005120840; заявл. 04.07.05; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12. – 6 с.
27. Witkowska E., Szczepaniak K., Biziuk M. Some applications of neutron activation analysis: a review // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2005. – V. 265. – P. 141–150.
28. Судько А.Ф. Определение урана, тория, скандия и некоторых редкоземельных элементов в двадцати четырех стандартных образцах сравнения инструментальным нейтронно-активационным методом // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции*. – Томск: STT, 2016. – С. 620–624.
29. Криночкин Л.А., Шкарин А.Б. Составление геохимических основ масштаба 1:1000 000 листов N-40,41,42, P-45,52,55,57, O-38,55,56. – М.: Росгеолфонд, 2011. – 178 с.
30. Камалетдинов М.А. Новая геология (теория шарьяжей) // *Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академии наук Республики Башкортостан*. – 1998. – № 3. – С. 10–23.
31. Murat Kamaletdinov and the struggle for acceptance of the thrust-nappe theory / I.M. Farkhutdinov, R.A. Ismagilov, A.M. Farkhutdinov, L.M. Farkhutdinova // *Earth Sciences History*. – 2017. – V. 36. – № 1. – P. 101–115.
32. Миннигизимов Н.С. Охрана и рациональное использование водных ресурсов в нефтяной промышленности: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Екатеринбург, 2000. – 45 с.
33. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). – Екатеринбург: УГГУ, 2013. – 199 с.
34. Геохимические особенности и условия образования медистых песчаников Оренбургского Предураля / А.В. Волков, И.А. Новиков, А.А. Разумовский, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова // *Литосфера*. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 593–606.
35. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbutov, A.V. Volostnov, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok // *International Journal of Coal Geology*. – 2011. – V. 86. – P. 318–328.
36. Abundance, distribution, and modes of occurrence of uranium in Chinese coals / J. Chen, P. Chen, D. Yao, W. Huang, S. Tang, K. Wang, W. Liu, Y. Hu, B. Zhang, J. // *Minerals*. – 2017. – V. 7. – Iss. 12. – Article 239.
37. Lauer N., Vengosh A., Dai S. Naturally occurring radioactive materials in uranium-rich coals and associated coal combustion residues from China // *Environmental Science and Technology*. – 2017. – V. 51. – P. 13487–13493.
38. Valuable elements in Chinese coals: a review / S. Dai, X. Yan, C.R. Ward, J.C. Hower, L. Zhao, X. Wang, L. Zhao, D. Ren, R.B. Finkelman // *International Geology Review*. – 2018. – V. 60. – P. 590–620.
39. Parzenty H.R., Rog L. The role of mineral matter in concentrating uranium and thorium in coal and combustion residues from power plants in Poland // *Minerals*. – 2019. – V. 9. – Iss. 5. – Article 312.
40. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2004 году. – Уфа: Министерство природных ресурсов, 2004. – 306 с.

Поступила 14.11.2019 г.

#### **Информация об авторах**

**Фархутдинов И.М.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии и полезных ископаемых Географического факультета Башкирского государственного университета.

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

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

**Фархутдинов А.М.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и полезных ископаемых Географического факультета Башкирского государственного университета.

**Злобина А.Н.**, ассистент кафедры геологии и полезных ископаемых Географического факультета Башкирского государственного университета; аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Исмагилов Р.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии УФИЦ РАН; доцент кафедры геофизики Башкирского государственного университета.

**Никонов В.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института безопасности жизнедеятельности.

**Белан Л.Н.**, доктор геолого-минералогических наук, директор Научно-исследовательского института безопасности жизнедеятельности.

UDC 549.01:550.4

## INFLUENCE OF GEOLOGICAL FACTORS ON URANIUM AND THORIUM DISTRIBUTION IN DRINKING WATER SALT DEPOSITS (REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

**Iskhak M. Farkhutdinov**<sup>1</sup>,  
iskhakgeo@gmail.com

**Bulat R. Soktoev**<sup>2</sup>,  
bulatsoktoev@tpu.ru

**Leonid P. Rikhvanov**<sup>2</sup>,  
rikhvanov@tpu.ru

**Anvar M. Farkhutdinov**<sup>1</sup>,  
anvarfarh@mail.ru

**Anastasia N. Zlobina**<sup>1,2</sup>,  
anastasiyazl@mail.ru

**Rustem A. Ismagilov**<sup>3,1</sup>,  
rustem\_ismagilov@bk.ru

**Vladimir N. Nikonov**<sup>4</sup>,  
nikon-ufa@mail.ru

**Larisa N. Belan**<sup>4</sup>,  
belan77767@mail.ru

<sup>1</sup> Bashkir State University,  
32, Validy street, Ufa, 450076, Russia.

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

<sup>3</sup> Institute of Geology Ufa Science Center RAS,  
16/2, K. Marks street, Ufa, 450000, Russia.

<sup>4</sup> Research Institute of Safety of Life,  
12/1, 8 Marta street, Ufa, 450005, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to study the sources of natural radioactive elements entering drinking water and their areal distribution, as well as the possibility of using carbonate sediments of drinking water (scale) in geochemical and environmental studies. In the Republic of Bashkortostan (Russia), these studies are favoured by different geological structures within the area (mountainous area, foredeep and platform) and variety of rocks of different age and composition (volcanic, igneous, sedimentary, metamorphic), which determines the diversity of the microelement profile of the area.

**The aim** of the research is to assess the radioactive elements content and spatial distribution in anthropogenic carbonate sediments (drinking water scale).

**Object of the research.** The data on U and Th content in 467 samples of carbonate deposits (scale) from 267 settlements of the Republic of Bashkortostan was analysed. Samples were taken from various utensils (enamelled and electric kettles, pots, boilers), which is used for boiling water from centralized and individual (wells, streams) water sources.

**Methods.** The method of instrumental neutron activation analysis based on the research nuclear reactor IRT-T TPU was used to analyse the uranium and thorium content. Data processing was carried out using software packages Statistica 8.0 and Microsoft Excel. The spatial distribution of natural radioactive elements was mapped using ArcGIS 10.2 in the Geostatistical Analyst module using the inverse distance method.

**Result.** The data obtained allow speaking about uneven distribution of natural radioactive elements (U, Th) in anthropogenic carbonate deposits on the territory of the Republic of Bashkortostan. The average level of the studied chemical elements is characterized by low values of both uranium and thorium. Variations of their content in the studied formations are determined by the combined impact of natural and anthropogenic factors. The regularities of U distribution in scale samples correspond to the geological structure of the territory. Within the platform part, uranium distribution is more uniform than in the mountainous part of the Republic, which reflects the comparative homogeneity of geological and tectonic conditions. According to the results of mapping, four zones of high uranium content in samples of anthropogenic carbonate deposits were identified: Trans-Uralian, Uralian, Western and Southern. In Th spatial distribution there was no clear correlation with the features of the geological structure and metallogeny of the territory. There are three zones: Northern, Central and South-Eastern. Negative anomalies of Th content geographically coinciding with large mining centers are noted. Th/U ratio is characterized by a low value for the whole territory of Bashkortostan – 0,002. At the same time, positive anomalies of this indicator were recorded in the Northern and South-Eastern parts of the Republic, where they are mainly determined by geological component.

### Key words:

Uranium, thorium, man made carbonates, geoecology, thorium-uranium ratio, Republic of Bashkortostan, Southern Urals, geochemistry, radioactive elements, drinking water.

*Scientific research was carried out within the program of TPU competitiveness enhancement among the leading research centers.*

### REFERENCES

1. *Carbonaty: mineralogiya i khimiya* [Carbonates: mineralogy and chemistry: translation from english]. Translated from English. Ed. by R.J. Rider. Moscow, Mir Publ., 1987. 496 p.
2. Morse J.W., Arvidson R.S., Luttge A. *Calcium carbonate formation and dissolution*. Chemical Reviews, 2007, vol. 107, pp. 342–381.
3. Pentecost A. *Travertine*. Berlin; Heidelberg, Springer-Verlag, 2005. 445 p.

4. Fairchild I.J., Treble P.C. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 2009, vol. 28, pp. 449–468.
5. Tanner L.H. Continental carbonates as indicators of paleoclimate. *Developments in Sedimentology*, 2010, vol. 62, pp. 179–214.
6. Zhang K.-J., Li Q.-H., Yan L.-L., Zeng L., Lu L., Zhang Y.-X., Hui J., Jin X., Tang X.-C. Geochemistry of limestones deposited in various plate tectonic settings. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 167, pp. 27–46.
7. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Ilenok S.S., Baranovskaya N.V., Taisaev T.T. Mineralogical-geochemical features of travertines of the modern continental hydrotherms: A G-1 well, Tunka depression, Baikal rift zone. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 331–347.
8. Teboul P.-A., Durllet C., Gaucher E.C., Virgone A., Girard J.-P., Curie J., Lopez B., Camoin G.F. Origins of elements building travertine and tufa: New perspectives provided by isotopic and geochemical tracers. *Sedimentary Geology*, 2016, vol. 334, pp. 97–114.
9. Ricketts J.W., Ma L., Wagler A.E., Garcia V.H. Global travertine deposition modulated by oscillations in climate. *Journal of Quaternary Science*, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1002/jqs.3144> (accessed 10 November 2019).
10. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 2014, vol. 4, pp. 1–51. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/234288836\\_Composition\\_of\\_the\\_Continental\\_Crust\\_Treatise\\_Geochem\\_31-64](https://www.researchgate.net/publication/234288836_Composition_of_the_Continental_Crust_Treatise_Geochem_31-64) (accessed 10 November 2019).
11. Grigoryev N.A. *Raspreделение khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2009. 382 p.
12. Smyslov A.A. *Uran i toriy v zemnoy kore* [Uranium and thorium in the earth's crust]. Leningrad, Nauka Publ., 1974. 231 p.
13. Evseeva L.S., Perelman A.I., Ivanov K.E. *Geokhimiya urana v zone gipergenezisa* [Geochemistry of uranium in the hypergenesis zone]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974. 278 p.
14. Allègre C.J., Dupré B., Lewin E. Thorium/uranium ratio of the Earth. *Chemical Geology*, 1986, vol. 56, no. 3–4, pp. 219–227.
15. Wipperfurth S.A., Guo M., Šrámek O., McDonough W.F. Earth's chondritic Th/U: negligible fractionation during accretion, core formation, and crust-mantle differentiation. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, vol. 498, pp. 196–202.
16. Liu H., Zartman R.E., Ireland T.R., Sun W. Global atmospheric oxygen variations recorded by Th/U systematics of igneous rocks. *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1902833116> (accessed 10 November 2019).
17. Kamal M.S., Hussein I., Mahmoud M., Sultan A.S., Saad M.A.S. Oilfield scale formation and chemical removal: a review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 171, pp. 127–139.
18. Richards C.S., Wang F., Becker W.C., Edwards M.A. A 21<sup>st</sup>-century perspective on calcium carbonate formation in potable water systems. *Environmental Engineering Science*, 2018, vol. 35, Iss. 3, pp. 143–158.
19. Tapkhaeva A.E., Taisaev T.T., Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V. Geochemical specialization of limescale of water sources illustrated by two regions in Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 498–507.
20. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Matveenko I.A. Mineralogical and geochemical characteristics of drinking water salt deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, Iss. 1, Article 012042.
21. Soktoev B.R., Rihvanov L.P., Arynova Sh.Zh., Baranovskaya N.V. Estestvennyye radioaktivnyye elementy (Th, U) v soleykhn otlozheniyakh prirodnykh presnykh vod [Natural radioactive elements (Th, U) in salt deposits of natural fresh water]. *Radioaktivnost i radioaktivnye element v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment: proceedings of the V International conference]. Tomsk, STT Publ., 2016. pp. 599–603.
22. Nikonov V.N. Prirodnaya i tekhnogennaya radioaktivnost Respubliki Bashkortostan [Natural and technogenic radioactivity of the Republic of Bashkortostan]. *Uralskiy ekologicheskii vestnik*, 2012, vol. 2 (31), pp. 23–30.
23. Belan L.N. *Geoekologicheskie osnovy prirodno-tekhnogennykh ekosistem gornorudnykh rayonov Bashkortostana*. Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [Geocological bases of natural and technogenic ecosystems of mining regions of Bashkortostan. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2007. 50 p.
24. Asylbaev I.G. *Otsenka geokhimicheskogo sostoyaniya pochv Yuzhnogo Urala*. Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [Assessment of the geochemical state of soils in the southern Urals. Dr. Diss. Abstract]. Ufa, 2016. 44 p.
25. Opekunova M.G., Somov V.V., Papyan E.E. Soil contamination in the impact zone of mining enterprises in the Bashkir Transural region. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, pp. 732–745.
26. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V., Yankovich E.P. *Sposob opredeleniya uchastkov zagryazneniya uranom okruzhayushchey sredy* [The method of determining areas of uranium contamination of the environment]. Patent RF, no. 2005120840, 2007.
27. Witkowska E., Szczepaniak K., Bizziuk M. Some applications of neutron activation analysis: a review. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2005, vol. 265, pp. 141–150.
28. Sudyko A.F. Opredelenie urana, toriya, skandiya i nekotorykh redkozemelnykh elementov v dvadtsati chetyrekh standartnykh obrazcah sravneniya instrumentalnym neytronno-aktivatsionnym metodom [Determination of uranium, thorium, scandium and some rare earth elements in twenty-four standard samples of comparison by instrumental neutron activation method]. *Radioaktivnost i radioaktivnye element v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proc. of the V International conference]. Tomsk, STT Publ., 2016. pp. 620–624.
29. Krinochkin L.A., Shkarin A.B. *Sostavlenie geokhimicheskikh osnov masshtaba 1:1000000 listov N-40,41,42, P-45,52,55,57, O-38,55,56* [Compilation of geochemical foundations scale 1:1000 000 sheets N-40,41,42, P-45,52,55,57, O-38,55,56]. Moscow, Rosgeofond Publ., 2011. 178 p.
30. Kamaletdinov M.A. Novaya geologiya (teoriya sharyazhey) [New Geology (thrust-nappe theory)]. *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnykh resursov Akademii nauk Respubliki Bashkortostan*, 1998, no. 3, pp. 10–23.
31. Farkhutdinov I.M., Ismagilov R.A., Farkhutdinov A.M., Farkhutdinova L.M. Murat Kamaletdinov and the struggle for acceptance of the thrust-nappe theory. *Earth Sciences History*, 2017, vol. 36, no. 1, pp. 101–115.
32. Minigazimov N.S. *Okhrana i ratsionalnoe ispolzovanie vodnykh resursov v neftyanoy promyshlennosti*. Avtoreferat Diss. Dokt nauk [Protection and rational use of water resources in the oil industry. Dr. Dis. Abstract]. Ekaterinburg, 2000. 45 p.
33. Kontar E.S. *Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdeniy medi, tsinka, svintsya na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [Geological and industrial types of copper, zinc, lead deposits in the Urals (geological conditions of placement, history of formation, prospects)]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2013. 199 p.
34. Volkov A.V., Novikov I.A., Razumovskiy A.A., Murashov K.Yu., Sidorova N.V. Geochemical features and formation conditions of the cupriFerous sandstones of the Orenburg pre-Urals. *Lithosphere*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 593–606. In Rus.
35. Arbuзов S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *International Journal of Coal Geology*, 2011, vol. 86, pp. 318–328.
36. Chen J., Chen P., Yao D., Huang W., Tang S., Wang K., Liu W., Hu Y., Zhang B., Sha J. Abundance, distribution, and modes of occurrence of uranium in Chinese coals. *Minerals*, 2017, vol. 7, Iss. 12, Article 239.
37. Lauer N., Vengosh A., Dai S. Naturally occurring radioactive materials in uranium-rich coals and associated coal combustion residues from China. *Environmental Science and Technology*, 2017, vol. 51, pp. 13487–13493.
38. Dai S., Yan X., Ward C.R., Hower J.C., Zhao L., Wang X., Zhao L., Ren D., Finkelman R.B. Valuable elements in Chinese coals: a review. *International Geology Review*, 2018, vol. 60, pp. 590–620.

39. Parzenty H.R., Rog L. The role of mineral matter in concentrating uranium and thorium in coal and combustion residues from power plants in Poland. *Minerals*, 2019, vol. 9, Iss. 5, Article 312.
40. *Gosudarstvenny doklad o sostoyanii prirodnykh resursov i okruzhayushchey sredy Respubliki Bashkortostan v 2004 godu* [State report on the state of natural resources and environment of the Republic of Bashkortostan in 2004]. Ufa, Natural resources Ministry Publ., 2004. 306 p.

*Received: 14 November 2019.*

#### **Information about the authors**

**Iskhak M. Farkhutdinov**, Cand. Sc., head of geological department, Bashkir State University.

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

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

**Anvar M. Farkhutdinov**, Cand. Sc., associate professor, Bashkir State University.

**Anastasia N. Zlobina**, assistant professor, Bashkir State University; post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Rustem A. Ismagilov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology Ufa Science Center RAS; associate professor, Bashkir State University.

**Vladimir N. Nikonov**, Cand. Sc., senior researcher, Research Institute of Safety of Life.

**Larisa N. Belan**, Dr. Sc., director, Research Institute of Safety of Life.

УДК 553.41: 553.041: 553.22

## КОЛЧЕДАНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЭНСИМАТИЧЕСКИХ ОСТРОВНЫХ ДУГ КАЗАХСТАНА НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АБЫЗ

Мазуров Алексей Карпович<sup>1</sup>,  
akm@tpu.ru

Рудмин Максим Андреевич<sup>1</sup>,  
rudminma@tpu.ru

Байболова Шынар Жуматаевна<sup>2</sup>,  
baibolova-sh@mail.ru

Кряжева Татьяна Владимировна<sup>2</sup>,  
kryazheva\_t@mail.ru

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

<sup>2</sup> Карагандинский государственный технический университет, Казахстан,  
100027, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56/1.

**Актуальность** исследования определяется необходимостью освещения новых данных по формированию колчеданного оруденения (Au-Cu-Pb-Ag) в энзиматических островных дугах поздней стадии развития. Проведенные исследования показали, что перспективы энзиматических островных дуг полностью не исчерпаны.

**Цель:** изучить петрологические, геохимические особенности пород и вещественный состав руд для уточнения прогнозно-поисковых критериев при прогнозировании и поисках колчеданного оруденения в энзиматических островодужных геологических образованиях.

**Методы** исследования включали изучение состава горных пород и руд с использованием классического минералогического, петрографического и минераграфического анализов и сканирующей электронной микроскопии. Химический состав пород определялся с помощью силикатного анализа. Данные химического анализа были пересчитаны по кислородному методу Т. Барта для определения привноса и выноса химических элементов.

**Результаты.** Колчеданные месторождения Казахстана в основном формировались в островодужной геодинамической обстановке. Островодужные палеосистемы Казахстана подразделяются на энзиматические и энсиалитические. С энсиалитическими островными дугами связано формирование Рудноалтайского полиметаллического пояса. Месторождение Абыз связано с формированием энзиматической островной дуги поздней стадии развития. Островодужное основание заложено на океанической коре и представлено преимущественно осадочными породами: вулканомиктовыми и полимиктовыми песчаниками, конгломератами и алевролитами. Породы, слагающие месторождение, подверглись интенсивному гидротермально-метасоматическому изменению, выразившемуся в пропилитизации и березитизации. В результате метасоматических процессов на месторождении было сформировано 13 рудных тел. Морфология рудных тел довольно сложная, формы линзовидные, линзовидно-пластовые. Основными минералами массивных колчеданных руд являются: халькопирит, пирит, сфалерит, галенит, блеклые руды, теллуриды (альтаит, раклиджит) и включения золота. Содержание серебра в золоте достигает 12,5 %.

### Ключевые слова:

Колчеданные месторождения, энзиматические островные дуги, золоторудная минерализация, гидротермально-метасоматические изменения, прогнозно-поисковые критерии, Казахстан.

### Введение

В балансе добычи свинца, цинка и меди колчеданные месторождения вулканической ассоциации играют значительную роль [1–10]. Практически каждая тектоническая провинция, имеющая в своем составе в качестве важной составляющей субмаринные вулканические породы, содержит, по крайней мере, небольшие месторождения колчеданных руд [2, 10–16]. Наиболее крупные Cu-Pb-Zn месторождения, которые относят к типу колчеданов, в настоящее время известны в следующих горно-рудных районах: Иберийский пиритный пояс, Урал, Рудный Алтай, зеленокаменные пояса Абитиб и Черчилл на Канадском щите, Британская Колумбия, Аппалачи и пояс Маунт-Рид на Тасмании [2, 3, 12, 17, 18]. В перечисленных выше провинциях сосредоточено около 75 % всех мировых запасов кол-

чеданных руд. Из колчеданных месторождений добывается не только подавляющее количество меди, цинка и свинца (10–15 % мировой добычи), но и существенные объемы золота, серебра и редкоземельных металлов. Образование колчеданных месторождений происходило с раннего архея непрерывно до позднего кайнозоя и генетически связано с подводно-морскими вулканогенными образованиями. Формирование наиболее крупных по запасам металлов месторождений происходило в периоды резкого сокращения вулканической деятельности. Анализ закономерностей размещения колчеданных месторождений показал, что они формировались в разнообразных геодинамических обстановках. По ряду признаков большинство исследователей выделяет четыре типа колчеданных месторождений: кипрский, уральский, Куроко и Бесши [5, 6, 19–31].

Для Казахстана характерны колчеданные месторождения двух типов: Куроко и уральский, которые формировались в основном в островодужной геодинамической обстановке. Анализ материалов геологических съемок масштабов 1:200000 и мельче позволил разделить все островодужные палеосистемы Казахстана на энсиматические и энсиалические. Г.Ф. Ляпичев предложил энсиматические образования считать первичными, а энсиалические, которые включают блоки более ранней континентальной коры, а океаническое основание в них не отмечается, – вторичными. По геологическим формациям, слагающим островодужные образования, в каждой группе выделяются островные дуги ранней и поздней стадий развития.

Уникальные месторождения Восточного Казахстана, которые образуют Рудноалтайский полиметаллический пояс, связаны с формированием энсиалических островных дуг. Открытые в пределах пояса месторождения характеризуются не только крупнейшими в мире концентрациями полиметаллических руд, но и значительными запасами серебра и золота [8, 11, 17, 32]. Геологическое строение, тектоника и магматизм, а также условия формирования и вещественный состав конкретных месторождений Рудноалтайского полиметаллического пояса изучены достаточно полно. В изучение как в целом территории, так и отдельных месторождений существенный вклад внесли работы известных исследователей: В.В. Авдонина, Д.Г. Аджирея, В.Д. Баранова, Э.Н. Баранова, Х.А. Беспяева, Н.Л. Бубличенко, Г.П. Болгова, Б.Н. Вейц, Д.М. Воинова, Ю.Ю. Ворбьева, Г.Д. Ганженко, А.А. Гармаша, Д.И. Горжевского, Ю.И. Демина, И.В. Дербилова, Н.И. Еремина, П.Ф. Иванкина, В.Д. Инина, П.В. Иншина, И.З. Исакович, А.К. Каюпова, О.А. Ковриго, В.А. Комар, М.С. Козлова, И.В. Крейтер, В.С. Кузбенова, В.В. Кузнецова, А.С. Лапухова, М.Ф. Микунова, Н.М. Митряевой, В.А. Наумова, В.П. Нехорошева, И.В. Покровской, Э.С. Пономарева, В.И. Старостина, Н.И. Стучевского, М.А. Тойбазарова, Л.М. Трубникова, Е.И. Филатова, М.Г. Хисамутдинова, В.М. Чекалина, Г.Н. Щербы, Г.Ф. Яковлева и многих других [8, 9, 17, 18, 32–36].

При составлении минерагенической карты Казахстана масштаба 1:2500000 к энсиматическим островным дугам ранней стадии развития нами были отнесены следующие металлогенические зоны: Иргизская, Федоровская, Бестюбинская, Бозшакольская, Жалаирнайманская, Шингиз-Тарбагатайская и Бестау-Кокпектинская. Основанием для отнесения указанных зон к раннему этапу развития послужило наличие в основании островодужных образований вулканогенных или осадочных формаций океанического дна (базальты, кремнисто-терригенные породы). Вулканогенные толщи представлены породами преимущественно основного, реже среднего и кислого состава, перемежающимися с осадочными породами. Основание разреза, как правило, сложено преимущественно вулканогенными породами с прослоями осадочных пород. Количество прослоев осадочных пород и их мощность меняется в широких пределах, но

для всех изученных разрезов выдерживается тенденция к увеличению осадочных пород к верхам разреза. Интрузивные породы представлены в основном разностями повышенной основности: габброидами, диоритами, гранодиоритами, плагиогранитами, реже гранитами, граносиенитами, ультраосновными разностями. Оруденение комплексное медно-молибденовое с золотом. Отдельные исследователи отмечали наличие в описываемых рудах платиноидов.

Майкаинская, Сувенир-Касмурунская, Абралинская и Сарытумская металлогенические зоны нами отнесены к энсиматическим островным дугам поздней стадии развития. Заложены дуги позднего этапа развития, как и раннего этапа развития, на океанической коре, но островодужные образования в них представлены преимущественно осадочными породами: вулканомиктовыми и полимиктовыми песчаниками, конгломератами, алевролитами, линзами известняков. Их разрез фактически повторяет верхи разреза энсиматических островных дуг ранней стадии развития. Интрузивные породы представлены плагиогранитами, гранодиоритами, диоритами, габбро, иногда ультрамафитами. К настоящему времени известно более двадцати месторождений, которые связаны с поздней стадией развития энсиматических островных дуг. Минеральный состав руд в основном представлен: пиритом, галенитом, сфалеритом и халькопиритом. При составлении минерагенической карты нами были выделены следующие металлогенические комплексы: медно-свинцово-цинково-золотые, риолит-трахириолит-андезит-базальтовые, нижне-средне-ордовикские Кумустинский, Торткудукский и Майкаинский; верхнеордовикский: Космурунский. Шатыркульский золото-медный гранодиорит-гранитный ордовикский металлогенический комплекс нами также отнесен к поздней островодужной стадии развития, но с большой долей условности. Наибольший практический интерес представляют месторождения Майкаинского, Космурунского и Торткудукского металлогенических комплексов.

Целью данной работы является изучение условий формирования колчеданного оруденения энсиматических островных дуг для определения перспектив развития минерально-сырьевой базы Центрального Казахстана.

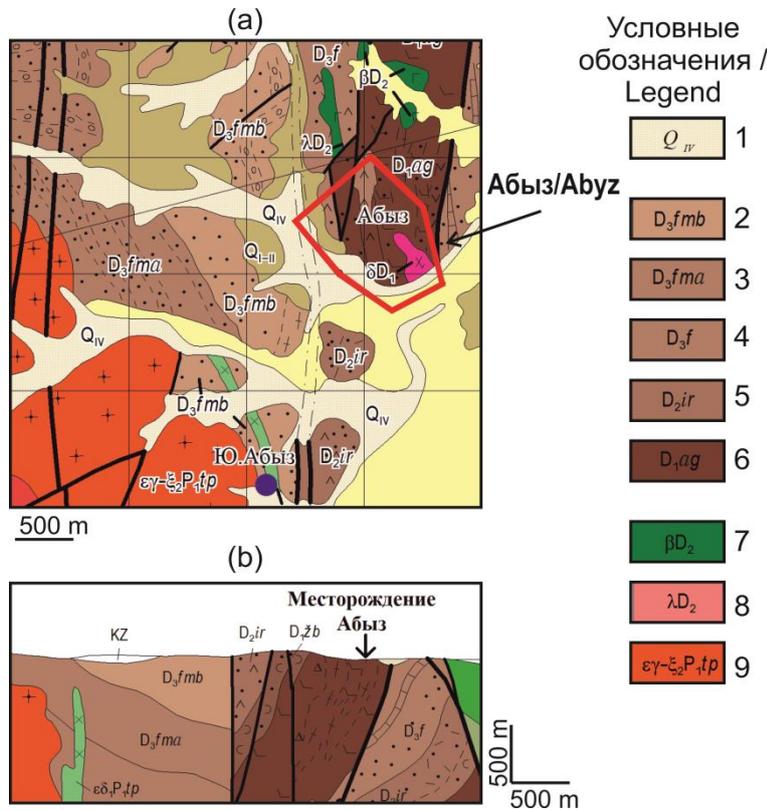
#### Объект исследования

В пределах образований энсиматических островных дуг выявлено более двух десятков колчеданно-полиметаллически-золотых месторождений – Майкаин, Торткудук, Акбастау, Кусмурун, Сувенир, Алпыс, Александровское, Абыз и др. Объектом исследования послужили руды и породы месторождения Абыз (рис. 1, а, 49°21'0" с.ш. 76°32'24" в.д.). Колчеданное полиметаллически-золотое месторождение Абыз [8, 11, 33, 35] можно считать репрезентативным объектом для изучения и оценки других месторождений, которые к настоящему времени выявлены или будут обнаружены в процессе дальнейших поисковых работ. Месторождение Абыз расположено в Карагандинской

области Республики Казахстан в 30 км к западу от рудника Кентюбе, связанного 30 километровой железнодорожной веткой с основной магистралью Карагайлы–Караганда.

В геологическом строении месторождения (рис. 1) принимают участие вулканогенно-осадочные отложения девона, прорванные интрузивными и субвулканическими образованиями средне-основного состава. Палеозойский фундамент площади месторождения на 80 % перекрыт чехлом рыхлых кайнозойских отложений мощностью от 5...10 до 40...50 м. Считалось, что девонские отложения залегают моноκлиально и имеют крутое падение на запад (рис. 1, b). Проведенное литологическое расчленение этих отложений на две

толщи: нижнюю и верхнюю, а последней на две пачки: базальтоидную и туфовую, позволило выявить в пределах западной части месторождения брахисинκлиальную структуру, выполаживающуюся к югу. В восточной части месторождения породы нижней толщи слагают опрокинутую антиκлиальную складку, также погружающуюся к югу. Опрокинутая антиκлиальная складка осложнена долго живущим Восточным разломом субмеридионального направления, разделяющим вулканогенно-осадочные отложения нижней толщи от верхней. Породы западного крыла синκлинали характеризуются относительно пологим падением (45...55°) на восток, крыло осложнено двумя тектоническими нарушениями типа взбросов.



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта месторождения Абыз (а) и схематический геологический разрез (б). Условные обозначения: 1 – четвертичная система (голоцен), аллювиальные и озерные пески, галечники, супеси, суглинки, глины; девонская система: 2 – фаменский ярус (верхняя пачка), известковисто-кремнистые тонкослоистые алевролиты с прослоями известняков; 3 – фаменский ярус (нижняя пачка), алевролиты и песчаники сероцветные, реже красноватые; 4 – верхний отдел (франский ярус), песчаники и алевролиты темно-серые с линзами органогенно-обломочных известняков; 5 – средний отдел (иргалинская свита), риолитовые, риодацитовые порфиры и их туфы, ингимбриты, прослои туфопесчаников; 6 – нижний отдел (айгыржальская свита), андезибазальтовые порфиры и их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты, риолиты и базальты; субвулканические образования: 7 – среднедевонские долериты и долеритовые порфиры; 8 – среднедевонские риолиты, трахидацииты и дациты; интрузивные образования: 9 – топарский комплекс (вторая фаза внедрения), кварцевые сиениты, граниты субцелочные мелкозернистые

**Fig. 1.** Simplified geological map of the Abyz deposit (a) and simplified geological section (b). Legend: 1 – Quaternary system (Holocene), alluvial and lake sands, pebbles, sandy loam, loam, clay; Devonian system: 2 – Famennian Stage (upper member), calcareous-siliceous thin-layer siltstones with limestone interbeds; 3 – Famennian Stage (lower member), siltstones and sandstones are gray-colored, less often red-colored; 4 – upper series (French Stage), sandstones and siltstones dark gray with lenses of organogenic clastic limestones; 5 – middle series (Irgalinskaya Stage), rhyolitic, rhyodacite porphyries and their tuffs, ingimbrites, tuff sandstones interbeds; 6 – lower series (Aygirzhal Stage), andesibasalt porphyrites and their tuffs, tuff sandstones, tuff siltstones, rhyolites and basalts; subvolcanic formations: 7 – Middle Devonian dolerites and dolerite porphyrites; 8 – Middle Devonian rhyolites, trachidocytes and dacites; intrusive formations: 9 – Toparsky complex (second phase of intrusion), quartz syenites, subalkaline fine-grained granites

### Материал и методика исследования

Месторождение изучалось скважинами колонкового бурения (109595 м), шурфами (75 м) и комплексом подземных горных выработок (3492 м). Все скважины и горные выработки были подвергнуты химическому опробованию. Из керновых и бороздовых проб были изготовлены прозрачные и полированные шлифы, которые в дальнейшем изучались с использованием классического минералогического анализа, петрографического и рудного микроскопов и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Силикатный анализ 138 керновых проб (весом от 2,7 до 4,0 кг), истертых до фракции менее 0,074 мм, выполнялся химическим методом в Центральной лаборатории ПГО «Центрказгеология» г. Караганда. СЭМ производилось с использованием микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного приставкой для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором.

### Результаты и обсуждения

Петрографо-минералогическая характеристика пород

Породы, слагающие месторождение, подверглись интенсивному гидротермально-метасоматическому изменению, выразившемуся в пропилитизации и березитизации.

Пропилитовая формация проявлена слабо и охватывает самую внешнюю зону гидротермально-измененных пород в области влияния крупных разломов в западной части месторождения. Она выражается в относительно слабом изменении андезитов, андезитобазальтов, туфов и лавобрекчий средне-основного состава. Изменения заключаются в частичном либо полном псевдоморфном замещении минералов вкрапленников и основной массы пород. Эпигенетические минералы представлены альбитом, хлоритом, эпидотом, кварцем, в меньшей степени – карбонатом, серицитом, актинолитом, пренитом, пумпелитом, лейкоксеном, пиритом и магнетитом. Для пропилитов весьма характерны пятнистые текстуры, обусловленные неравномерным распределением хлорита, эпидота и актинолита в виде пятен, различных по размерам и форме.

В пределах формации пропилитизированных пород выделяется несколько зон, характеризующихся развитием статистически устойчивых ассоциаций новообразованных минералов:

- зона развития альбит-хлоритовых и кварц-хлоритовых ассоциаций с некоторым содержанием карбоната, прослеживается вдоль основных долгоживущих разломов;
- зона развития кварц-эпидотовых и хлорит-эпидотовых ассоциаций с небольшим количеством серицита, карбоната, лейкоксена и пренита, приурочена к участкам повышенной проницаемости;
- зона развития высокотемпературных альбит-актинолитовых и карбонат-актинолитовых ассоциаций, имеет весьма ограниченное (локальное) распространение.

Выделенные пропилитовые ассоциации образуют следующий возрастной ряд: альбит-хлоритовые → кварц-хлоритовые → хлорит-эпидотовые → кварц-эпидотовые. Березитовая гидротермально-метасоматическая формация проявлена на месторождении наиболее широко. По ряду признаков выделяется два типа парагенезиса березитов.

Первый представлен кварц-светлослюдистыми образованиями, наиболее развит на месторождении. В пределах березитовой зоны выделяются серицит-кварцевые и кварц-серицитовые метасоматиты, в которых концентрируется пирит, образуя густовкрапленные и сплошные серно-колчеданные руды.

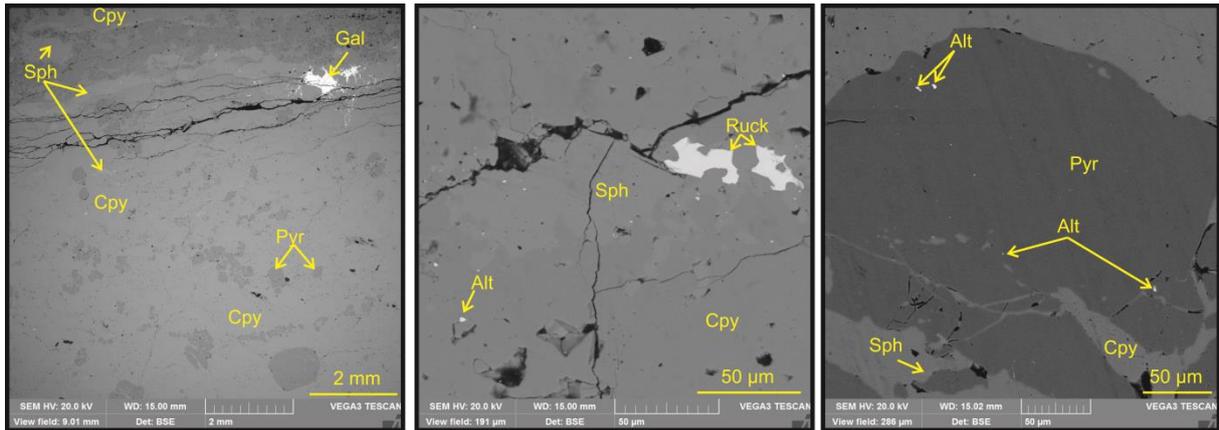
Второй представлен карбонат-серицитовыми и кварц-хлорит-карбонатными ассоциациями. Минеральные ассоциации данного типа проявлены в виде прожилковых и струйчатых выделений. С ними тесно ассоциирует пирит поздних генераций, отлагающийся в завершающейся стадии рудообразования в колчеданно-полиметаллических рудах и кварц-карбонатных прожилках.

В пределах выделенной минеральной ассоциации березитовой формации намечается следующий возрастной ряд: карбонат-серицитовые → кварц-хлорит-карбонатные → кварц-серицитовые → серицит-кварцевые.

Основные минералы колчеданных руд (рис. 2) представлены халькопиритом, пиритом, сфалеритом, галенитом, блеклыми рудами, теллуридами и включениями золота и пр. [37]. В общем виде в сульфидных рудах наблюдается постепенное выделение минералов в следующей последовательности: пирит, халькопирит, сфалерит, блеклые руды (минералы группы тетраэдрита) + галенит + теллуриды Pb и Bi, реже Ag + золото. Золото (рис. 3) наблюдается в виде отдельных зёрен размером 1,5...10 мкм и приурочено к низкотемпературной ассоциации минералов с теллуридами Pb (алтаит, PbTe) и Bi (раклиджит, PbBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>). Содержание серебра в золотинках достигает 12,5 %. Гессит (Ag<sub>2</sub>Te) встречается в виде тонких зёрен (просечек) с халькопиритом, толщиной в несколько мкм, в пирите пропилитовой формации.

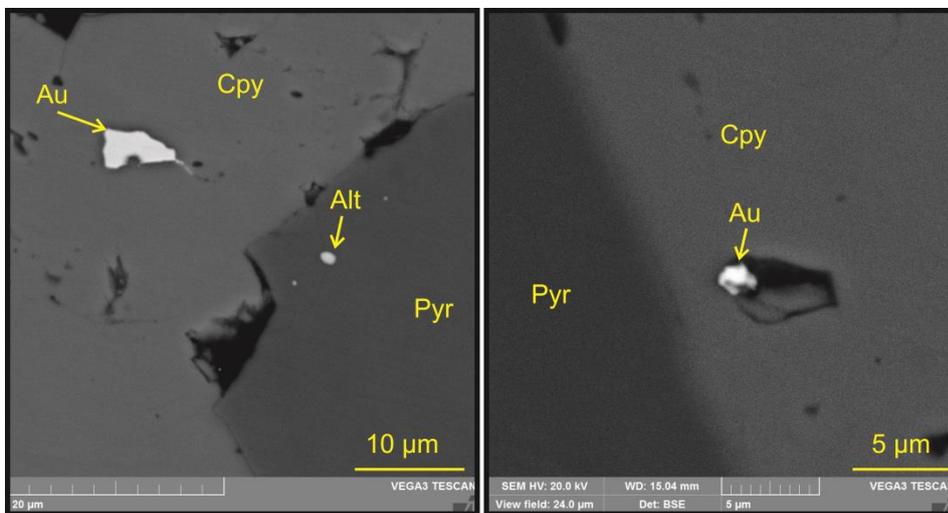
Петрохимическая характеристика пород

В целях изучения процессов, происходящих при образовании выделенных формаций, из каждой зоны отобраны пробы, которые затем были проанализированы в лаборатории Центрально-Казахстанского геологического объединения. Данные химического анализа были пересчитаны по кислородному методу Т. Барта (т. к. пористость пород не определялась). Результаты анализов проб и пересчета приведены в табл. 1, 2, соответственно. В результате проделанной работы установлено, что в процессе формирования пропилитовой формации происходит вынос кремния, натрия и калия и накопление кальция углерода, трехвалентного железа и частично магния. Поведение алюминия, титана, фосфора и марганца при метасоматическом изменении исходных пород остается не измененным во всех зонах.



**Рис. 2.** СЭМ-снимки (снимки сканирующего электронного микроскопа) основной ассоциации минералов сульфидной (халькопиритовой) массивной руды: Py – пирит, Cpy – халькопирит, Sph – сфалерит, Gal – галенит, Alt – алтаит, Ruck – раклиджит

**Fig. 2.** SEM-images (scanning electron microscopy images) of main mineral association in massive sulfide (chalcopyrite) ore: Py – pyrite, Cpy – chalcopyrite, Sph – sphalerite, Gal – galena, Alt – altaite, Ruck – rucklidgeite



**Рис. 3.** СЭМ-снимки включений золота в сульфидных рудах: Au – gold, Py – pyrite, Cpy – Alt – altaite

**Fig. 3.** SEM-images of gold inclusions in sulfide ore: Au – gold, Py – pyrite, Cpy – Alt – altaite

При образовании березитовой минеральной ассоциации по андезитам происходит привнос калия, кремния и углерода, по андезитобазальтам – калия, кремния и частично алюминия. Остальные элементы при формировании березитовой формации выносятся. Преобладающий вынос щелочных и щелочно-земельных катионов при высокой активности в реакциях замещения кремния и алюминия, доминирующий кварц-светлослюдистый парагенезис, устойчивый в кислой среде, позволяет говорить об образовании серицит-кварцевых метасоматитов в стадию кислотного выщелачивания. Формирование серицит-кварцевых метасоматитов сопровождалось образованием значительного количества пирита. Завершалось формирование метасоматитов образованием прожилков кварцевого и кварц карбонатного состава, которые пересекают руды и вмещающие породы.

В результате метасоматических процессов на месторождении было сформировано 13 рудных тел. Морфология рудных тел довольно сложная, формы линзовидные, линзовидно-пластовые. Как по паде-

нию, так и по простиранию отмечаются раздувы и пережимы, изгибы, апофизы. Выклинивание в основном постепенное, плавное. Простирание рудных тел субмеридианальное, падение западное, юго-западное, углы падения от слабо наклонных (35...55°) до крутых (75...90°).

Основное рудное тело является самым крупным и выдержанным. В нем заключено 73 % запасов руды Восточного участка и 65 % Западного участка. В строении рудного тела участвуют как сплошные, так и вкрапленные сульфидные руды, распространение которых не имеет четкой закономерности. Как правило, сплошные руды приурочены к участкам раздувов и верхней части, нижняя часть рудного тела сложена в основном вкрапленными рудами. Контуры рудного в участках развития сплошных руд четкие и совпадают с геологическими границами метасоматитов. Вкрапленные руды не имеют четких геологических границ.

Руды комплексные, наряду с золотом в них присутствуют: серебро, медь, цинк, свинец, что отражается в их минеральном составе (рис. 2, 3).

**Таблица 1.** Химический состав (вес. %) пород месторождения Абыз

**Table 1.** Chemical composition (wt. %) of rocks in Aбыз deposit

Оксиды/Oxides	Крупнообломочный туф андезитового состава Coarse graining andesite tuff	Метасоматиты по крупнообломочным туфам андезитового состава Metasomatites for coarse graining andesite tuff				Андезитобазальты Andesibasalt	Метасоматиты по андезитобазальтам Metasomatites for andesibasalt			
		Карбонат-эпидотовый Carbonate-epidote	Хлорит-карбонат-серцитовый Chlorite-carbonate-sericite	Кварц-серцитовый Quartz-sericite	Серцит-кварцевый Sericite-quartz		Эпидот-хлорит-карбонатный Epidote-chlorite-quartz	Серцит-хлорит-кварцевый Sericite-chlorite-quartz	Карбонат-кварц-серцитовый Carbonate-quartz-sericite	Серцит-кварцевый Sericite-quartz
SiO <sub>2</sub>	58,36	44,85	56,12	64,72	71,41	44,48	40,84	57,25	61,48	66,20
TiO <sub>2</sub>	0,55	0,36	0,45	0,50	0,37	0,53	0,35	0,56	0,46	0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,54	14,55	15,48	13,59	11,37	13,37	13,74	14,53	13,43	15,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,19	6,67	2,14	1,25	5,54	4,76	6,51	2,78	3,85	1,81
FeO	5,32	3,47	4,72	1,14	1,20	5,06	3,23	4,52	7,35	1,99
MnO	0,093	0,22	0,14	0,026	0,02	0,265	0,15	0,14	0,28	0,052
MgO	3,50	4,45	2,74	0,81	0,52	7,18	4,36	2,77	2,88	1,27
CaO	2,54	15,09	5,66	0,72	0,51	8,8	18,75	5,68	1,03	3,07
K <sub>2</sub> O	1,10	0,26	1,40	4,0	3,10	0,25	0,50	1,84	2,40	2,18
Na <sub>2</sub> O	4,60	1,27	2,40	0,13	0,30	2,40	0,75	0,82	0,15	3,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	0,065	0,23	0,21	0,11	0,13	0,078	0,16	0,25	0,13
п.п.п. L.O.I	4,23	8,18	7,50	5,90	4,67	11,66	10,98	8,60	5,85	4,35
CO <sub>2</sub>	1,4	4,16	4,40	0,20	0,20	6,86	6,51	–	0,88	2,24
общ. total	0,005	0,006	0,050	5,67	4,41	0,021	0,006	–	2,61	0,005

Примечание: анализы выполнены в центральной лаборатории ПГО «Центрказгеология», г. Караганда; п.п.п. – потери при прокаливании.

Note: analyzes were performed in the central laboratory of the Tsentrkazgeologiya PGO, Karaganda; L.O.I – loss on ignition.

**Таблица 2.** Расчет привноса (+) и выноса (–) элементов при гидротермально-метасоматических изменениях

**Table 2.** Calculation of influx (+) and removal (–) of elements during hydrothermal-metasomatic changes

Элементы/Elements	Крупнообломочный туф андезитового состава Coarse graining andesite tuff	Метасоматиты по крупнообломочным туфам андезитового состава Metasomatites for coarse graining andesite tuff				Андезитобазальты Andesibasalt carbonate-epidote	Метасоматиты по андезитобазальтам Metasomatites for andesibasalt			
		Карбонат-эпидотовый Carbonate-epidote	Хлорит-карбонат-серцитовый Chlorite-carbonate-sericite	Кварц-серцитовый Quartz-sericite	Серцит-кварцевый Sericite-quartz		Эпидот-хлорит-карбонатный Epidote-chlorite-quartz	Серцит-хлорит-кварцевый Sericite-chlorite-quartz	Карбонат-кварц-серцитовый Carbonate-quartz-sericite	Серцит-кварцевый Sericite-quartz
K	1,21	–0,21	+0,35	+3,14	+1,10	0,26	+0,28	+1,63	+2,34	+1,84
Na	7,51	–3,82	–2,45	–7,33	–7,01	4,15	–2,96	–2,86	–3,95	–0,88
Ca	2,32	+10,65	+2,99	–1,66	–1,87	8,36	+9,81	–3,28	–7,43	–1,29
Mg	4,38	–0,03	–0,79	–3,34	–3,78	9,51	–3,58	–6,08	–5,77	–4,56
Mn	0,05	+0,11	+0,05	–0,04	–0,04	0,21	–0,11	–0,12	–0,01	–0,02
Fe <sup>+2</sup>	3,73	–1,10	–0,25	+4,32	–3,03	3,73	–1,34	–0,60	+1,05	–2,32
Fe <sup>+3</sup>	2,01	+2,02	–0,56	–1,26	+1,5	3,15	+1,31	+0,23	–0,66	–1,98
AL	15,42	–1,23	+0,51	–1,88	–4,09	13,88	+0,70	+0,36	–0,14	–0,95
Ti	0,35	–0,04	–0,19	0,07	–0,10	0,36	–0,15	+0,03	–0,05	–0,16
Si	49,35	–8,86	–0,20	+5,58	+10,83	39,38	–2,49	+8,24	+14,23	+7,25
P	0,20	–	–0,10	–0,11	–0,1	0,10	–	–0,01	–0,03	–
C	1,61	+3,36	+3,64	–1,43	–1,11	8,25	–0,26	–	–7,21	+0,83
OH	15,67	+4,71	+2,14	+16,40	+9,25	28,28	–1,40	+19,54	+0,55	–7,32

**Выводы**

Формирование пород, слагающих месторождение Абыз, происходило в вулканической островодужной системе активной континентальной окраины. Об этом

свидетельствует преобладающий андезитовый состав вулканитов, высокая степень эксплозивности, широкое развитие грубообломочных терригенных пород. Породы, вмещающие оруденение, подверглись ин-

тенсивным гидротермально-метасоматическим изменениям, относящимся к тектоногенным региональным формациям, представленным пропилитовыми и березитовыми статистически устойчивыми ассоциациями. Последовательность гидротермально-метасоматических образований направлена от пропилитов к березитам. Преобладающий вынос щелочных и щелочно-земельных катионов при высокой активности в реакциях замещения кремния и алюминия, доминирующий кварц-светлослюдистый парагенезис позволяют говорить об образовании серецит-кварцевых метасоматитов в стадию кислотного выщелачивания. Формирование метасоматитов сопро-

вождалось осаждением значительного количества пирита.

В пределах метасоматически измененных пород выделено 13 рудных тел. Морфология рудных тел линзовидная, линзовидно-пластовая. Руды комплексные: медно-свинцово-цинковые с золотом и серебром. Золото наблюдается в виде отдельных зёрен размером 1,5...10 мкм и приурочено к низкотемпературной ассоциации минералов с теллуридами Pb (алтаит, PbTe) и Bi (раклиджит, PbBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>). Содержание серебра в золотинках достигает 12,5 %. Гессит (Ag<sub>2</sub>Te) встречается в виде тонких зёрен (просечек) с халькопиритом толщиной в несколько мкм в пирите пропилитовой формации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hydrothermal alteration of a 1 km section through the upper oceanic crust, Deep Sea Drilling Project Hole 504B: Mineralogy, chemistry, and evolution of seawater-basalt interactions / J.C. Alt, J. Honnorez, C. Laverne, R. Emmermann // *Journal of Geophysical Research*. – 1986. – V. 91. – P. 10309–10335.
2. German C.R., Von Damm K.L. Hydrothermal Processes // *Treatise on Geochemistry*. – 2003. – V. 6–9. – P. 181–222.
3. Classification of VMS deposits: lessons from the South Uralides / R. Herrington, V. Maslennikov, V. Zaykov, I. Seravkin, A. Kosarev, B. Buschmann, J.-J. Orgeval, N. Holland, S. Tsalina, P. Nimis, R. Armstrong // *Ore Geology Reviews*. – 2005. – V. 27 (1–4). – P. 203–237.
4. Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia / V.V. Maslennikov, N.R. Ayupova, N.P. Safina, A.S. Tseluyko, I.Y. Melekestseva, R.R. Large, R.J. Herrington, V.A. Kotlyarov, I.A. Blinov, S.P. Maslennikova, S.G. Tsalina // *Minerals*. – 2019. – V. 9 (3). – P. 1–38.
5. Oxidative dissolution of hydrothermal mixed-sulphide ore: an assessment of current knowledge in relation to seafloor massive sulphide mining / E.K. Fallon, S. Petersen, R.A. Brooker, T.B. Scott // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 86. – P. 309–337.
6. The discovery of native gold in massive sulfides from the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge and its significance / Z.W. Wu, X.M. Sun, Y.Z. Dai, G.Y. Shi, Y. Wang, Y. Lu, Y.H. Liang // *Acta Petrologica Sinica*. – 2011. – V. 27 (12). – P. 3749–3762.
7. Occurrences and distribution of «invisible» precious metals in sulfide deposits from the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge / Z. Wu, X. Sun, H. Xu, H. Konishi, Y. Wang, C. Wang, Y. Dai, X. Deng, M. Yu // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – V. 79. – P. 105–132.
8. Абдулин А.А., Шлыгин А.Е. Металогения и менеральные ресурсы Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 176 с.
9. Берикболов Б.Р. Меднорудные формации Казахстана. – Алматы: Гылым, 1999. – 196 с.
10. Мазуров А.К. Металлогения и оценка рудоносности металлогенических комплексов островных дуг // *Геология и охрана недр*. – 2002. – Т. 3. – С. 2–10.
11. Мазуров А.К. Металлогеническое районирование Казахстана // *Известия Томского политехнического университета*. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 33–39.
12. Dill H.G. The «chessboard» classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium // *Earth-Science Reviews*. – 2010. – V. 100 (1–4). – P. 1–420.
13. Massive sulfides of Mount Jourdan along the super-slow spreading Southwest Indian Ridge and their genesis / B. Nayak, P. Halbach, B. Pracejus, U. Münch // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 63. – P. 115–128.
14. Taylor C.D., Lear K.G., Newkirk S.R. A genetic model for the greens creek polymetallic massive sulfide deposit, admiralty island, southeastern Alaska // *US Geological Survey Professional Paper*. – 2010. – V. 1763. – P. 419–429.
15. The metallogeny of Late Triassic rifting of the Alexander terrane in southeastern Alaska and northwestern British Columbia / C.D. Taylor, W.R. Premo, A.L. Meier, J.E. Taggart Jr. // *Economic Geology*. – 2008. – V. 103 (1). – P. 89–115.
16. Texture, mineralogy and geochemistry of hydrothermally altered submarine volcanics recovered southeast of Cheshire Seamount, western Woodlark Basin / A. Vishiti, S. Petersen, C.E. Suh, C.W. Devey // *Marine Geology*. – 2014. – V. 347. – P. 69–84.
17. Щерба Г.Н. Геотектоника и металлогения. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 176 с.
18. Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана / Н.А. Берзин, Р.К. Колмак, Н.Л. Добрецов, Л.П. Зоненшайн, Э.З. Чанг // *Геология и геофизика*. – 1994. – Т. 35 (7–8). – С. 8–28.
19. Cu-(Ni-Co-Au)-bearing massive sulfide deposits associated with mafic-ultramafic rocks of the Main Urals Fault, South Urals: Geological structures, ore textural and mineralogical features, comparison with modern analogs / I.Y. Melekestseva, V.V. Zaykov, P. Nimis, G.A. Tret'yakov, S.G. Tsalina // *Ore Geology Reviews*. – 2013. – V. 52. – P. 18–36.
20. Gold-And silver-rich massive sulfides from the semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13'N, Mid-Atlantic ridge: a case of magmatic contribution? / I.Y. Melekestseva, V.V. Maslennikov, G.A. Tret'yakov, P. Nimis, V.E. Beltenev, I.I. Rozhdestvenskaya, S.P. Maslennikova, E.V. Belogub, L. Danyushevsky, R. Large, A.M. Yuminov, S.A. Sadykov // *Economic Geology*. – 2017. – V. 112 (4). – P. 741–773.
21. Mineralogy and geochemistry of metalliferous sedimentary rocks from the upper cretaceous VMS deposits of the eastern pontides (NE Turkey) / M.K. Revan, Y. Genç, O. Delibaş, V.V. Maslennikov, N.R. Ayupova, O. Zimtoğlu // *Turkish Journal of Earth Sciences*. – 2019. – V. 28 (2). – P. 299–327.
22. The enrichment characteristic and mechanism of gold-silver minerals in submarine hydrothermal sulfides from the ultra-slow-spreading SWIR / Y. Wang, X.-M. Sun, Z.-W. Wu, X.-G. Deng, Y.-Z. Dai, Z.-Y. Lin // *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis*. – 2014. – V. 34 (12). – P. 3327–3332.
23. Physicochemical parameters of magmatic and hydrothermal processes at the Yaman-Kasy massive sulfide deposit, the southern Urals / V.A. Simonov, S.V. Kovyazin, E.O. Terenya, V.V. Maslennikov, V.V. Zaykov, S.P. Maslennikova // *Geology of Ore Deposits*. – 2006. – V. 48 (5). – P. 369–383.
24. Invisible gold in sulfides from seafloor massive sulfide edifices / N.S. Bortnikov, L.J. Cabri, I.V. Vikentiev, B.R. Tagirov, G. Mc Mahon, Y.A. Bogdanov, O.O. Stavrova // *Geology of Ore Deposits*. – 2003. – V. 45 (3). – P. 201–212.
25. Geochemical behavior during mineralization and alteration events in the Baiyinchang volcanic-hosted massive sulfide deposits, Gansu Province, China / K. Dong, S. Chen, I. Graham, J. Zhao, P. Fu, Y. Xu, G. Tian, W. Qin, J. Chen // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 91. – P. 559–572.
26. Geodiversity of hydrothermal processes along the mid-atlantic ridge and ultramafic-hosted mineralization: a new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposit / Y. Fouquet, P. Cambon, J. Etoubeau, J.L. Charlou, H. Ondreas, F.J.A.S. Barga, G. Cherkashov, T. Semkova, I. Poroshina, M. Bohn, J.P. Donval, K. Henry, P. Murphy, O. // *Rouxel Geophysical Monograph Series*. – 2013. – V. 188. – P. 321–367.
27. Hydrodynamic modeling of magmatic-hydrothermal activity at submarine arc volcanoes, with implications for ore formation /

- G. Gruen, P. Weis, T. Driesner, C.A. Heinrich, C.E.J. de Ronde // Earth and Planetary Science Letters. – 2014. – V. 404. – P. 307–318.
28. Geology and geochemistry of sediment-hosted Hanönü massive sulfide deposit (Kastamonu – Turkey) / K. Günay, C. Dönmez, V. Oyan, N. Yıldırım, E. Çiftçi, H. Yıldız, S. Özkümüş // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 101. – P. 652–674.
29. Further occurrence of brown ores in Kuroko-type deposits in Japan / A. Imai, O. Ishizuka, R. Yamada, H. Miyamoto // Resource Geology. Dept. of Earth and Planetary Science – 2001. – V. 51 (3). – P. 263–268.
30. Environmental controls on biomineralization and Fe-mound formation in a low-temperature hydrothermal system at the Jan Mayen Vent Fields / K.C. Johannessen, J. Vander Roost, H. Dahle, S.H. Dundas, R.B. Pedersen, I.H. Thorseth // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2017. – V. 202. – P. 101–123.
31. Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals / V.V. Maslennikov, N.R. Ayupova, R.J. Herrington, L.V. Danyushevskiy, R.R. Large // Ore Geology Reviews. – 2012. – V. 47. – P. 5–41.
32. Chekalin V.M., D'yachkov B.A. Rudny Altai base-metal belt: Localization of massive sulfide mineralization // Geology of Ore Deposits. – 2013. – V. 55 (6). – P. 438–454.
33. Мирошниченко Л.А., Жуков Н.М., Беспяев Х.А. Минерагеническая карта Казахстана // Геология Казахстана. – 2001. – Т. 3–4. – С. 73–85.
34. Зональность сегментированности и палеогеодинамика девонского вулканического пояса Центрального Казахстана / А.М. Курчавов, М.С. Гранкин, Е.Г. Мальченко, В.И. Жуковский, Б.С. Хамзин, А.К. Мазуров, С.Х. Хамза // Геотектоника. – 2000. – Т. 4. – С. 32–43.
35. Бекжанов Г.Р. Глубинное строение и меднопорфировое оруденение Джунгаро-Балхашской складчатой системы. – Алма-Ата: Наука, 1984. – 230 с.
36. Беспяев Х.Ф., Николаев Л.Г., Тойбазаров М.А. Колчеданно-полиметаллические месторождения Прииртышского района. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 178 с.
37. Байболова Ш.Ж., Мазуров А.К., Кряжева Т.В. Геология и типы руд месторождения Абыз // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина. – Томск, 2019. – С. 140–142.

Поступила 01.11.2019 г.

#### Информация об авторах

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

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Байболова Ш.Ж.**, докторант кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Карагандинского государственного технического университета.

**Кряжева Т.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Карагандинского государственного технического университета.

UDC 553.41: 553.041: 553.22

## MASSIVE SULFIDE DEPOSITS OF ENSIMATIC ISLAND ARCS OF KAZAKHSTAN ON THE EXAMPLE OF ABYZ DEPOSIT

**Aleksey K. Mazurov<sup>1</sup>,**  
akm@tpu.ru

**Maxim A. Rudmin<sup>1</sup>,**  
rudminma@tpu.ru

**Shynar Zh. Baibolova<sup>2</sup>,**  
baibolova-sh@mail.ru

**Tatyana V. Kryazheva<sup>2</sup>,**  
kryazheva\_t@mail.ru

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

<sup>2</sup> Karaganda State Technical University of the Department of Geology and Exploration of Mineral Deposits,  
56/1, Nursultan Nazarbayev Avenue, Karaganda, 100027, Kazakhstan.

*The relevance of the study is caused by the need to highlight new conditions for formation of massive sulfide mineralization (Au-Cu-Pb-Ag) in late-stage ensimatic island arcs. This study shown that the prospects of ensimatic island arcs are not fully exhausted.*

*The work aim is to study the petrological, mineralogical and geochemical features of the rocks and ore composition to clarify criteria in forecasting and searching for massive sulfide mineralization in ensimatic island-arc geological formations.*

*Research methods included studying the composition of rocks and ores using classical mineralogical, petrographic, and mineralographic analyzes and scanning electron microscopy. The chemical composition was determined using silicate analysis. Chemical analysis data were recalculated using the T. Bart oxygen method to determine the influx and removal of chemical elements.*

*The results. The massive sulfide deposits of Kazakhstan were mainly formed in the island-arc geodynamic condition. The island-arc paleosystems are subdivided into ensimatic and ensialic. The formation of the Rudny Altai polymetal belt is associated with ensialic island arcs. The Abyz deposit is associated with the formation of the late stage evolution of ensimatic island arc. The island-arc base was laid on the oceanic crust and is predominantly represented by sedimentary rocks, such as volcanomictic and polymictic sandstones, conglomerates, and siltstones. The main initial rocks of deposit were changed by intense hydrothermal-metasomatic processes, which was reflected in propylization and berezitization. Thirteen ore bodies were formed within the deposit as a result of metasomatic processes. Morphology of ore bodies is complex with lenticular, lenticular-stratum forms. The main minerals of massive sulfide ores are chalcopyrite, pyrite, sphalerite, galena, fahlore, tellurides (altaite, rucklidgeite) and gold inclusions. The silver content in gold is up to 12,5 %.*

### Key words:

Massive sulfide deposit, ensimatic island arcs, gold ores, hydrothermal-metasomatic changes, forecast and search criteria, Kazakhstan.

### REFERENCES

- Alt J.C., Honnorez J., Laverne C., Emmermann R. Hydrothermal alteration of a 1 km section through the upper oceanic crust, Deep Sea Drilling Project Hole 504B: Mineralogy, chemistry, and evolution of seawater-basalt interactions. *Journal of Geophysical Research*, 1986, vol. 91, pp. 10309–10335.
- German C.R., Von Damm K.L. Hydrothermal Processes. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 6–9, pp. 181–222.
- Herrington R., Maslennikov V., Zaykov V., Seravkin I., Kosarev A., Buschmann B., Orgeval J.-J., Holland N., Tesalina S., Nimis P., Armstrong R. Classification of VMS deposits: Lessons from the South Uralides. *Ore Geology Reviews*, 2005, vol. 27 (1–4), pp. 203–237.
- Maslennikov V. V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Y., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tsalina S.G. Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 2019, vol. 9 (3), pp. 1–38.
- Fallon E.K., Petersen S., Brooker R.A., Scott T.B. Oxidative dissolution of hydrothermal mixed-sulphide ore: an assessment of current knowledge in relation to seafloor massive sulphide mining. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 86, pp. 309–337.
- Wu Z.W., Sun X.M., Dai Y.Z., Shi G.Y., Wang Y., Lu Y., Liang Y.H. The discovery of native gold in massive sulfides from the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, vol. 27 (12), pp. 3749–3762.
- Wu Z., Sun X., Xu H., Konishi H., Wang Y., Wang C., Dai Y., Deng X., Yu M. Occurrences and distribution of «invisible» precious metals in sulfide deposits from the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 79, pp. 105–132.
- Abdulin A.A., Shlygin A.E. *Metallogeniya i meneralnye resursy Kazakhstana* [Metallogeny and mineral resources of Kazakhstan]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1988. 176 p.
- Berikbolov B.R. *Mednorudnye formatsii Kazakhstana* [Copper ore formations of Kazakhstan]. Almaty, Gylm Publ., 1999. 196 p.
- Mazurov A.K. Metallogeniya i otsenka rudnosnosti metallogenicheskikh kompleksov ostrovnykh dug [Metallogeny and ore-bearing estimation of metallogenic complexes of island arcs]. *Geology and Mineral Protection*, 2002, vol. 3, pp. 2–10.
- Mazurov A.K. Metallogenetic zoning of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 33–39. In Rus.
- Dill H.G. The «chessboard» classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 100 (1–4), pp. 1–420.
- Nayak B., Halbach P., Pracejus B., Münch U. Massive sulfides of Mount Jourdan along the super-slow spreading Southwest Indian Ridge and their genesis. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 63, pp. 115–128.
- Taylor C.D., Lear K.G., Newkirk S.R. A genetic model for the greens creek polymetallic massive sulfide deposit, admiralty island,

- southeastern Alaska. *US Geological Survey Professional Paper*, 2010, vol. 1763, pp. 419–429.
15. Taylor C.D., Premo W.R., Meier A.L., Taggart Jr. J.E. The metallogeny of Late Triassic rifting of the Alexander terrane in southeastern Alaska and northwestern British Columbia. *Economic Geology*, 2008, vol. 103 (1), pp. 89–115.
  16. Vishiti A., Petersen S., Suh C.E., Devey C.W. Texture, mineralogy and geochemistry of hydrothermally altered submarine volcanics recovered southeast of Cheshire Seamount, western Woodlark Basin. *Marine Geology*, 2014, vol. 347, pp. 69–84.
  17. Shcherba G.N. *Geotektonika i metallogeniya* [Geotectonics and metallogeny]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1988. 176 p.
  18. Berzin N.A., Kolmak R.K., Dobretsov N.L., Zonenshain L.P., Chang E.Z. Geodinamicheskaya karta zapadnoy chasti Paleozaziatskogo okeana [Geodynamic map of the western part of the Pale-Asian Ocean]. *Geology and Geophysics*, 1994, vol. 35 (7–8), pp. 8–28.
  19. Melekestseva I.Y., Zaykov V.V., Nimis P., Tret'yakov G.A., Tessalina S.G. Cu-(Ni-Co-Au)-bearing massive sulfide deposits associated with mafic-ultramafic rocks of the Main Urals Fault, South Urals: Geological structures, ore textural and mineralogical features, comparison with modern analogs. *Ore Geology Reviews*, 2013, vol. 52, pp. 18–36.
  20. Melekestseva I.Y., Maslennikov V.V., Tret'yakov G.A., Nimis P., Beltenev V.E., Rozhdstvenskaya I.I., Maslennikova S.P., Belogub E. V., Danyushevsky L., Large R., Yuminov A.M., Sadykov S.A. Gold-And silver-rich massive sulfides from the semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13'N, Mid-Atlantic ridge: a case of magmatic contribution? *Economic Geology*, 2017, vol. 112 (4), pp. 741–773.
  21. Revan M.K., Genç Y., Delibaş O., Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Zimitoğlu O. Mineralogy and geochemistry of metalliferous sedimentary rocks from the upper cretaceous VMS deposits of the eastern pontides (NE Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2019, vol. 28 (2), pp. 299–327.
  22. Wang Y., Sun X.-M., Wu Z.-W., Deng X.-G., Dai Y.-Z., Lin Z.-Y. The enrichment characteristic and mechanism of gold-silver minerals in submarine hydrothermal sulfides from the ultra-slow-spreading SWIR. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, vol. 34 (12), pp. 3327–3332.
  23. Simonov V.A., Kovyazin S.V., Terenya E.O., Maslennikov V.V., Zaykov V.V., Maslennikova S.P. Physicochemical parameters of magmatic and hydrothermal processes at the Yaman-Kasy massive sulfide deposit, the southern Urals. *Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48 (5), pp. 369–383.
  24. Bortnikov N.S., Cabri L.J., Vikentiev I.V., Tagirov B.R., Mc Mahon G., Bogdanov Y.A., Stavrova O.O. Invisible gold in sulfides from seafloor massive sulfide edifices. *Geology of Ore Deposits*, 2003, vol. 45 (3), pp. 201–212.
  25. Dong K., Chen S., Graham I., Zhao J., Fu P., Xu Y., Tian G., Qin W., Chen J. Geochemical behavior during mineralization and alteration events in the Baiyinchang volcanic-hosted massive sulfide deposits, Gansu Province, China. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 559–572.
  26. Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J., Charlou J.L., Ondreas H., Barriga F.J.A.S., Cherkashov G., Semkova T., Poroshina I., Bohn M., Donval J.P., Henry K., Murphy P., Rouxel O. Geodiversity of hydrothermal processes along the mid-atlantic ridge and ultramafic-hosted mineralization: A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposit. *Geophysical Monograph Series*, 2013, vol. 188, pp. 321–367.
  27. Gruen G., Weis P., Driesner T., Heinrich C.A., de Ronde C.E.J. Hydrodynamic modeling of magmatic-hydrothermal activity at submarine arc volcanoes, with implications for ore formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, vol. 404, pp. 307–318.
  28. Günay K., Dönmez C., Oyan V., Yıldırım N., Çiftçi E., Yıldız H., Özkümüş S. Geology and geochemistry of sediment-hosted Hanönu massive sulfide deposit (Kastamonu – Turkey). *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 101, pp. 652–674.
  29. Imai A., Ishizuka O., Yamada R., Miyamoto H. Further occurrence of brown ores in Kuroko-type deposits in Japan. *Resource Geology*, 2001, vol. 51 (3), pp. 263–268.
  30. Johannessen K.C., Vander Roost J., Dahle H., Dundas S.H., Pedersen R.B., Thorseth I.H. Environmental controls on biomineralization and Fe-mound formation in a low-temperature hydrothermal system at the Jan Mayen Vent Fields. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 202, pp. 101–123.
  31. Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Danyushevskiy L.V., Large R.R. Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals. *Ore Geology Reviews*, 2012, vol. 47, pp. 5–41.
  32. Chekalin V.M., D'yachkov B.A. Rudny Altai base-metal belt: localization of massive sulfide mineralization. *Geology of Ore Deposits*, 2013, vol. 55 (6), pp. 438–454.
  33. Miroshnichenko L.A., Zhukov N.M., Bospayev Kh.A. Mineragenicheskaya karta Kazakhstana [Mineragenic map of Kazakhstan]. *Geology of Kazakhstan*, 2001, no. 3–4, pp. 73–85.
  34. Kurchavov A.M., Grankin M.S., Malchenko E.G., Zhukovsky V.I., Khamzin B.S., Mazurov A.K., Khamza S.Kh. Zonalnost segmentirovannost i paleogeodinamika devonskogo vulkanicheskogo poyasa Tsentralnogo Kazakhstana [Zoning segmentation and paleogeodynamics of the Devonian volcanic belt of Central Kazakhstan]. *Geotectonics*, 2000, vol. 4, pp. 32–43.
  35. Bekzhanov G.R. *Glubinnoe stroenie i mednoporfirovooe orudnenie Dzhungaro-Balkhashskoy skladchatoy sistemy* [Deep structure and copper-porphyry mineralization of the Dzhungar-Balkhash folded system]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1984. 230 p.
  36. Bospayev H.F., Nikolaev L.G., Toybazarov M.A. *Kolchedannopolimetallicheskie mestorozhdeniya Priirtyskogo rayona* [Massive sulfide and polymetallic deposits of the Irtysh region]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1988. 178 p.
  37. Baybolova Sh.Zh., Mazurov A.K., Kryazheva T.V. Geologiya i tipy rud mestorozhdeniya Abyz [Geology and types of ores of the Abyz deposit]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K.I. Satpaeva, 120-letiyu so dnya rozhdeniya professors K.V. Radugina* [Problems of Geology and Subsoil Development: Proc. of the XXIII International Symposium named after academician M.A. Usov of students and young scientists dedicated to the 120<sup>th</sup> birthday of academician K.I. Satpayev, 120<sup>th</sup> birthday of professor K.V. Radugin]. Tomsk, 2019. pp. 140–142.

Received: 1 November 2019.

#### Information about the authors

- Aleksey K. Mazurov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Shynar Zh. Baibolova**, postgraduate, Karaganda State Technical University.  
**Tatyana V. Kryazheva**, Cand. Sc., associate professor, Karaganda State Technical University.

УДК 339.13:546.711

## КРИТИЧЕСКИЕ ТОВАРНЫЕ ПОТОКИ МАРГАНЦЕВОГО СЫРЬЯ В РОССИИ

Боярко Григорий Юрьевич<sup>1</sup>,  
gub@tpu.ru

Хатьков Виталий Юрьевич<sup>2,1</sup>,  
vitaliy@payler.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> ПАО «Газпром»,  
Россия, 196143, г. Санкт-Петербург, пл. Победы, 2.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью изучения проблем импортозависимости России по марганцевому сырью.

**Цель:** изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) марганцевых продуктов (руд и концентратов, ферромарганца, силикомарганца и марганца металлического); выработка рекомендаций по оптимизации товарооборота марганцевых продуктов.

**Методы:** статистический, графический, логический.

**Результаты.** Марганцевые продукты являются одним из самых массовых импортозависимых товаров России, которых в 2018 г. суммарно импортировано свыше 1,6 млн т, что составляет 72 % от их потребления. Импортозависимость по марганцевым рудам по состоянию на 2018 г. составляет 100 % от потребления (импортировано 1318 тыс. т), по силикомарганцу – 46 % (импорт 192 тыс. т), по марганцу металлическому – 100 % (импорт 68 тыс. т) и по ферромарганцу – 10 % (импорт 21 тыс. т). Потребление марганцевого концентрата увеличилось с 285 тыс. т в 1996 г. до 1,3 млн т в 2018 г. (+7,2 %/год). В ближайшее время черная металлургия России не сможет обойтись без импорта марганцевого концентрата. Требуется серьезное упорядочение импортных поставок марганцевого концентрата из Казахстана, Южно-Африканской Республики и Габона, а также российские инвестиции в зарубежные марганцеодобывающие и ферросплавные компании. Национальное потребление силикомарганца увеличилось с 170 тыс. т в 1998 г. до 455 тыс. т в 2017 г. (+5,3 %/год), а производство возросло с 50 до 355 тыс. т/год (+6,5 %/год). Объемы импорта силикомарганца остаются на прежнем уровне – 170–190 тыс. т/год, хотя в 2003–2008 гг. они составляли 310–435 тыс. т/год. Сократившийся импорт с Украины замещен поставками из Грузии, Казахстана и Норвегии. Национальное потребление ферромарганца увеличилось незначительно – с 193 тыс. т в 1996 г. до 262 тыс. т в 2017 г. (+0,6 %/год), причем объемы производства резко возросли с 50 до 260 тыс. т/год (+6,5 %/год). Объемы импорта ферромарганца при этом серьезно сократились с 130 до 21 тыс. т/год (–3,9 %/год). Ферромарганец вышел из полной импортной зависимости в импортнезависимую категорию. Появился спрос на новый товарный продукт – марганец металлический, потребление которого выросло с 0,3 тыс. т в 1996 г. до 68 тыс. т в 2018 г. (+12,2 %/год). На фоне тотального импорта марганцевых ферросплавов появилось явление встречной импортно-экспортной торговли (экспорт до 63 тыс. т/год ферромарганца и до 133 тыс. т/год силикомарганца), вплоть до формирования направления нетто-экспорта ферромарганца (до 41 тыс. т/год ферромарганца).

### Ключевые слова:

Ферросплавная промышленность России, марганцевые руды и концентраты, ферромарганец, силикомарганец, марганец металлический, импортозависимость, встречные товарные потоки.

### Введение

Марганец – традиционный легирующий металл, используемый в производстве ферросплавов (ферромарганца и силикомарганца) для раскисления сталей при плавке, производства легированных чугуна и стали, а также для изготовления марганецсодержащих бронз, латуней и других сплавов с цветными металлами, обладающих антикоррозийными свойствами. До 10 % марганца потребляется в электротехнической (производство сухих батарей) и в химической промышленности.

Исходным сырьем для производства марганцевых сплавов являются оксидные, карбонатные, силикатные и смешанные марганцевые руды. Наиболее качественными являются оксидные марганцевые руды, из которых наибольшую ценность представляют пиролюзитовые и богатые псиломелан-пиролюзитовые руды. Богатые руды непосредственно являются товарным продуктом, а бедные обогащают для получе-

ния концентратов, содержащих свыше 36 % Mn [1]. Товарными продуктами марганцевого минерального сырья являются: марганцевые руды и концентраты, ферромарганец, силикомарганец и марганец металлический.

В результате образования на постсоветском пространстве новых стран СНГ произошло разрушение экономических связей самодостаточного минерально-сырьевого комплекса и потребляющих отраслей промышленности СССР. Переориентация национальных экономических интересов привела к изменению рынков минерального сырья, в первую очередь для обеспечения собственных нужд, а также к появлению новых направлений товарных потоков сырья. Если СССР до 1991 г. был мировым лидером по добыче марганцевого сырья, то в России, где его добыча просто отсутствовала, сформировались критические импортные потоки марганцевых руд и концентратов (свыше 250 тыс. т/год, 95 % от потребления), ферромарганца

(свыше 200 тыс. т/год, 70 %) и силикомарганца (свыше 150 тыс. т/год, 70 %). В начале XXI в. появился новый импортный поток марганца металлического (до 68 тыс. т/год, 100 % от потребления). Кроме этого, ферросплавные заводы, используя свободу для маневра реализации продукции, в отдельные годы направляли производственные ферросплавные на экспорт, создавая встречные импортно-экспортные потоки ферромарганца (до 63 тыс. т/год, 48 % от производства) и силикомарганца (до 133 тыс. т/год, 70 %) [1, 2]. Импортозависимость по марганцевому сырью, собственно, свойственна всем странам-лидерам металлургического производства – США (100 % по импорту) [3], странам Европейского Союза (90 %) [4], Китаю (до 60 %), Индии (до 50 %), Японии (100 %), Южной Кореи (100 %) [5].

### Методы исследований

С целью изучения российского рынка марганцевых продуктов были обработаны данные по движению их товарных потоков за 1996–2018 гг., по динамике их мировых цен и цен российского импорта и экспорта. Источники информации: Государственные

доклады Федерального агентства недропользования Российской Федерации [6], статистические данные Федеральной службы государственной статистики [7] и Федеральной таможенной службы [8] России, обзоры информационных центров [5, 9, 10].

Объемы товарных потоков марганцевого сырья учтены в метрических тоннах, а цены – в долларах США за тонну товара. Обобщенные суммарные объемы марганцевых продуктов приведены в пересчете на 100 % Mn. Доли импорта определялись по отношению импортных объемов к объемам национального потребления и реализации (потребления + экспорта), доли экспорта – по отношению экспортных объемов к объемам национального производства. Среднемировые цены марганцевых продуктов рассчитаны как средневзвешенные данные цен главных стран-экспортеров марганцевого сырья. Темпы годовых изменений во времени абсолютных показателей (объемы, стоимость) определяются в виде сложных процентов, относительных показателей (цены, доли) – в виде простых процентов.



**Рис. 1.** Марганценозные провинции, месторождения марганца; предприятия, добывающие, перерабатывающие и потребляющие марганцевое сырье: 1 – марганценозные провинции (I – Северо-Кавказская, II – Южно-Уральская, III – Средне-Уральская, IV – Полярно-Уральская, V – Северо-Тиманская (Архангельская), VI – Новоземельская, VII – Алтайская, VIII – Салаиро-Кузнецкая, IX – Енисейская, X – Восточно-Саянская, XI – Прибайкальская, XII – Забайкальская, XIII – Приаргунская, XIV – Хинганская, XV – Средне-Амурская, XVI – Удско-Шантарская, XVII – Усть-Майская, XVIII – Сахалинская, XIX – Камчатская); 2 – месторождения марганца; 3, 4 – марганцедобывающие предприятия (3 – действующие, 4 – законсервированные); 5 – металлургические предприятия, потребляющие марганцевое сырье

**Fig. 1.** Manganese provinces, manganese deposits; companies and plants producing, processing and consuming manganese raw materials: 1 – manganese provinces (I – Severo-Kavkazskaya, II – Yuzhno-Uralskaya, III – Sredne-Uralskaya, IV – Polyarno-Uralskaya, V – Severo-Timanskaya (Arhangelskaya), VI – Novozemelskaya, VII – Altayskaya, VIII – Salairo-Kuznetskaya, IX – Eniseyskaya, X – Vostochno-Sayanskaya, XI – Pribaykalskaya, XII – Zabaykalskaya, XIII – Priargunskaya, XIV – Khinganskaya, XV – Sredne-Amurskaya, XVI – Udsko-Shantarskaya, XVII – Ust-Mayskaya, XVIII – Sakhalinskaya, XIX – Kamchatskaya); 2 – manganese deposits; 3, 4 – manganese mining companies (3 – active, 4 – stopped); 5 – metallurgical companies and plants that consume manganese materials

### Состояние марганцевых добывающих и ферросплавных производств в России

Ситуация по обеспечению черной металлургии России марганцевым сырьем остается крайне напряженной [1, 2, 11–17]. После распада СССР практически все предприятия, добывающие марганец, остались за пределами России (на Украине, в Грузии и Казахстане). В настоящее время 100 % внутреннего российского потребления марганцевой руды и около 40 % потребления марганцевых сплавов удовлетворяется за счет импорта.

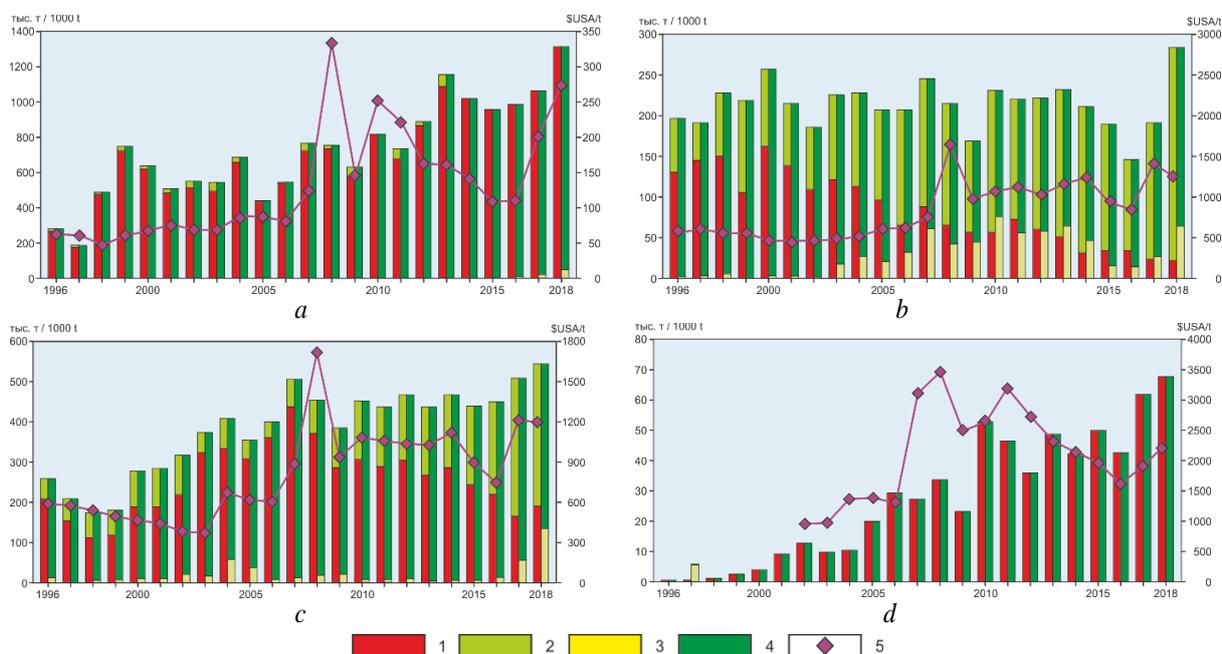
Добыча *марганцевых руд* на территории России осуществляется в небольших объемах и sporadически – на Парнокском месторождении в Республике Коми, Тынтинском месторождении в Свердловской области, Громовском месторождении в Забайкальском крае, Дурновском месторождении в Кемеровской области и Мазульском месторождении в Красноярском крае (рис. 1). В 2013 г. была достигнута максимальная добыча в 66 тыс. т, но в 2014 г. промышленная разработка марганцевых руд в России была прекращена.

Подготавливаются к эксплуатации Усинское месторождение марганцевых руд в Кемеровской области (ЗАО «ЧЕК-СУ.ВК») и Южно-Хинганское месторождение в Еврейской АО (китайская компания ООО «Хэмн Дальний Восток»). Периодический интерес вызывает возможная разработка крупного Порожинского месторождения в Красноярском крае.

Общий уровень национального потребления марганцевых руд и концентратов прямо пропорционален динамике выпуска российскими металлургическими предприятиями стальной продукции; он вырос с 284 тыс. т в 1996 г. до 1276 тыс. в 2018 г. со среднегодо-

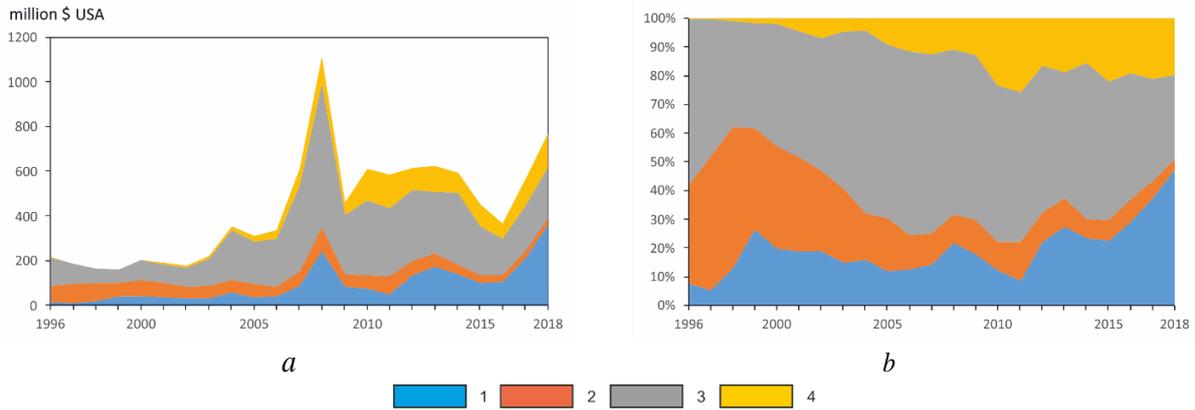
вым приростом +7,2 % (рис. 2, *a*). Доля импорта при этом составляет в разные годы от 91,2 до 100 % (рис. 3). Среднегодовой прирост объемов импорта марганцевых руд и концентратов составил за этот период +7,4 %. Стоимость годового импорта марганцевого сырья составляла 34–57 млн \$ США в период 1999–2007 гг., увеличилась до 245 млн \$ США к 2008 г., упала в результате финансового кризиса до 51 млн \$ США в 2011 г. и восстановила тенденцию роста вплоть до 365 млн \$ США в 2018 г. (рис. 3, *a*). Доля стоимости марганцевых руд и концентратов, длительное время составлявшая 15–25 % от суммы марганцевых продуктов, начиная с 2016 г. стала расти, вплоть до 47,3 % в 2018 г. (рис. 3, *b*).

С увеличением переработки марганцевых руд на украинских заводах к 2000 г. была прекращена отгрузка никопольского марганцевого концентрата на российские ферросплавные заводы. Этот отток был компенсирован увеличением импорта из Казахстана и появлением новых потоков марганцевого сырья из Южно-Африканской Республики и Габона (рис. 5, *a*). Импорт марганцевого концентрата из Казахстана в 1999–2014 гг. составлял 335–670 тыс. т/год, но в последние годы он сократился, вплоть до 128 тыс. т в 2018 г. Начиная с 2006 г. осуществляются поставки марганцевого сырья из Южно-Африканской Республики, увеличившиеся к 2018 г. до 843 тыс. т. С 2016 г. начаты поставки высококачественных марганцевых руд из Габона, достигшие в 2018 г. 338 тыс. т. Осуществляются также закупки марганцевого концентрата из Болгарии (до 191 тыс. т/год), Австралии (до 87 тыс. т/год), Бразилии (до 52 тыс. т/год) и Грузии (до 28 тыс. т/год).

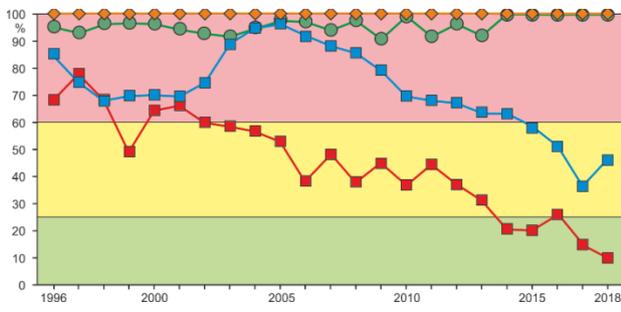


**Рис. 2.** Балансы рынков марганцевого сырья в России за 1996–2018 гг. Составлено по данным [6–10]: *a*) марганцевых руд и концентратов; *b*) ферромарганца; *c*) силикомарганца; *d*) марганца металлического. 1 – импорт, 2 – производство, 3 – экспорт, 4 – нетто-потребление, 5 – цены импорта

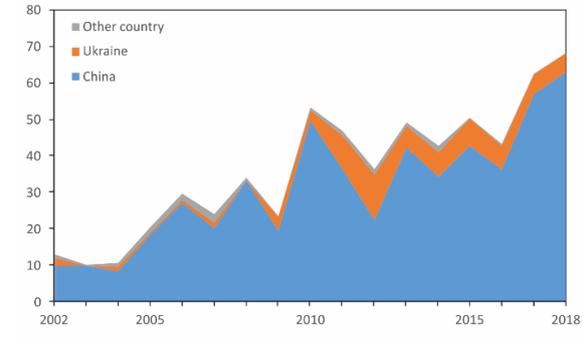
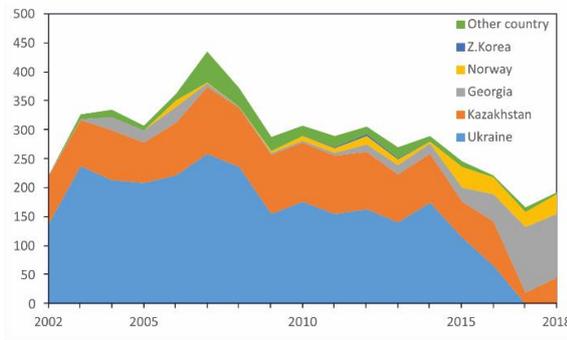
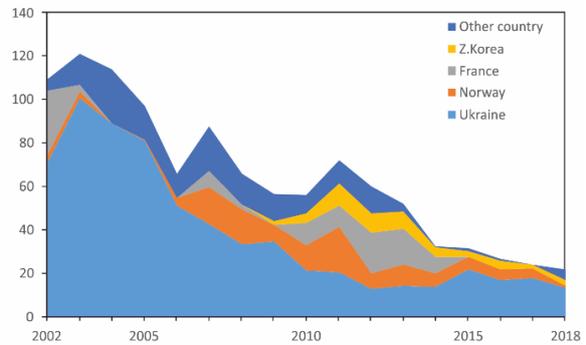
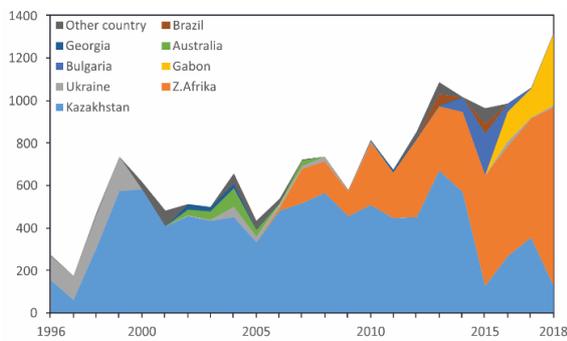
**Fig. 2.** Balance of the markets of manganese raw materials in Russia for 1996–2018. Based on the data [6–10]: *a*) manganese ores and concentrates; *b*) ferromanganese; *c*) silicomanganese; *d*) metal manganese. 1 – import, 2 – production, 3 – export, 4 – net consumption, 5 – import prices



**Рис. 3.** Динамика стоимости импорта в Россию марганцевых продуктов (a) и их долей (b) за 1996–2018 гг. 1 – марганцевые руды и концентраты, 2 – ферромарганец, 3 – силикомарганец, 4 – марганец металлический  
**Fig. 3.** Dynamics of the value of import to Russia manganese products (a) and fraction (b) for 1996–2018. 1 – manganese ore, 2 – silicomanganese, 3 – ferromanganese, 4 – metal manganese



**Рис. 4.** Динамика долей импорта (от потребления) марганцевых продуктов за 1996–2018 гг. ● – марганцевых руд и концентратов, ■ – ферромарганца, ■ – силикомарганца, ◆ – марганца металлического. Зеленая область – отсутствие импортозависимости, желтая – низкая импортозависимость, красная – высокая импортозависимость  
**Fig. 4.** Dynamics of share of import (consumption) of manganese products for 1996–2018. ● – manganese ores and concentrates, ■ – ferromanganese, ■ – silicomanganese, ◆ – metal manganese. Green area – no import dependence, yellow – low import dependence, red – high import dependence



**Рис. 5.** Динамика объемов импорта по странам-продавцам: марганцевых руд и концентратов за 1996–2018 гг.: a) ферромарганца; b) силикомарганца; c) марганца металлического; d) за 2002–2018 гг., тыс. т. Составлено по данным Федеральной таможенной службы РФ [8]  
**Fig. 5.** Dynamics of import volume by exporting countries: manganese ores and concentrates for 1996–2018: a) ferromanganese; b) silicomanganese; c) metal manganese; d) for 2002–2018, kt. Based on the data [8]

Экспорт марганцевых руд и концентратов из России крайне незначителен и составляет максимум 46 тыс. т (3,5 % от реализации [потребления + экспорта]) в 2018 г.

Среднемировые экспортные цены на марганцевые руды и концентраты (рис. 6, а) имеют четыре временных тренда: стабильный уровень 55–90 \$ США/т в период 1996–2006 гг.; рост цен до абсолютного максимума 296 \$ США/т в 2008 г. и последующая посадка до 133 \$ США/т в 2009 г.; спад цен в период 2010–2016 гг. с 205 до 107 \$ США/т и последний рост до максимума в 332 \$ США/т в 2018 г. Цены импорта марганцевого концентрата в Россию лишь изредка (1996–1999, 2003–2004 гг.) были ниже среднемировых цен, в остальные периоды российский импорт был на 15–30 % дороже среднемирового уровня. Впрочем, цена на концентрат дифференцирована в зависимости от качества руд, и повышенные цены российского импорта свидетельствует о значительной доле высококачественных руд в объемах импорта (из Габона, Бразилии и ЮАР). В то время основная масса поставок марганцевых руд среднего качества из Республики Казахстан поступает по ценам, на 5–35 % ниже среднероссийских импортных цен.

Основными потребителями марганцевых руд являются российские предприятия, выпускающие марганцевые ферросплавы (рис. 1):

- АО «Серовский завод ферросплавов» в г. Серов Свердловской области;
- ООО «Саткинский чугуноплавильный завод» в г. Сатка Челябинской области;

- ООО «Алапаевский металлургический завод» в г. Алапаевске Свердловской области;
- ПАО «Ключевский завод ферросплавов» в пос. Двуреченск Свердловской области;
- АО «Челябинский электрометаллургический комбинат» в г. Челябинск;
- ПАО «Косогорский металлургический завод» в г. Тула;
- АО «Кингисеппский ферросплавный завод» в г. Кингисепп Ленинградской области.

Производство марганцевых ферросплавов из марганцевых руд осуществляется доменным, электрометаллургическим и гидрометаллургическим способами [11].

Хотя мощности по производству ферросплавов России (290 тыс. т/год по ферромарганцу [5] и 410 тыс. т/год по силикомарганцу [6]) позволяют полностью обеспечить металлургические предприятия страны марганцевой продукцией дефицит сырой руды и значительные издержки на ее транспортировку делают эти предприятия менее эффективными. Они испытывают значительную конкуренцию со стороны иностранных производителей ферросплавов, и, соответственно, существуют проблемы по замещению импортных поставок марганцевых ферросплавов [13–16].

На рис. 2, б показана динамика рынка ферромарганца в России. Производство ферромарганца в России имеет тенденцию к росту с 46 тыс. т (25 % от национального потребления) в 1997 г. до 262 тыс. т в 2018 г. (превышает российское потребление) со среднегодовым приростом +6,5 %. Национальное потребление ферромарганца составляет 170–220 тыс. т/год.

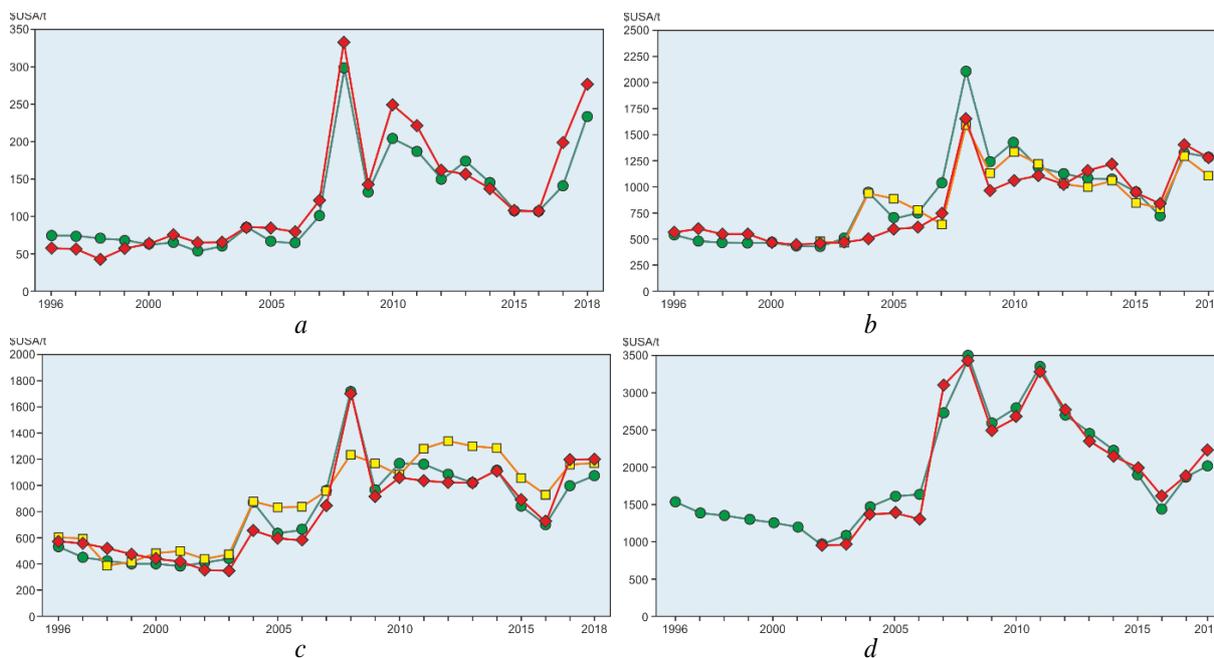
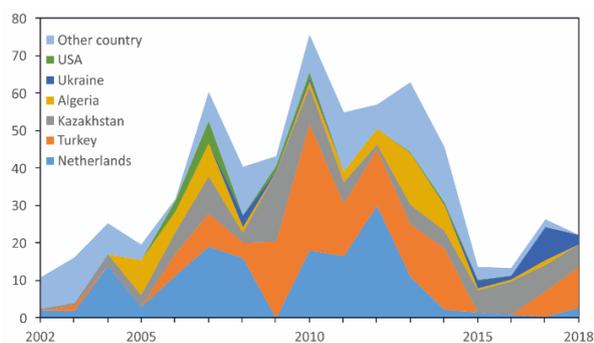


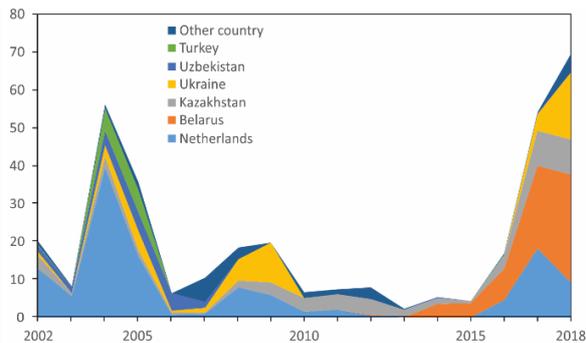
Рис. 6. Динамика цен на марганцевые продукты за 1996–2018 гг. Составлено по данным [7–9]: а) марганцевые руды и концентраты; б) ферромарганец; в) силикомарганец; д) марганец металлический. ● – среднемировые цены экспорта, ◆ – импорт в Россию, ■ – экспорт из России

Fig. 6. Dynamics of prices for manganese products for 1996–2018. Based on the data [7–9]: а) manganese ores and concentrates; б) ferromanganese; в) silicomanganese; д) manganese metal. ● – world average export prices, ◆ – import to Russia, ■ – export from Russia

Дефицит потребления ферромарганца перекрывается импортом из Украины, Норвегии, а также из Франции и Южной Кореи (рис. 5, *b*). В целом его объемы импорта имеют четко выраженную тенденцию к снижению со 150 тыс. т в 1998 г. до 22 тыс. т в 2018 г. со среднегодовым понижением объемов – 7,8 %. Он сопровождался снижением поставок с Украины (со 100 тыс. т в 2003 г. до 13 тыс. т в 2014 г., а также прекращением в 2015 г. импорта из Франции).



*a*



*b*

**Рис. 7.** Динамика объемов экспорта ферромарганца (*a*) и силикомарганца (*b*) по странам-покупателям за 2002–2018 гг., тыс. т. Составлено по данным Федеральной таможенной службы России [8]

**Fig. 7.** Dynamics of exports of ferromanganese (*a*) and silicomanganese (*b*) in importing countries for 2002–2018, thousand tons. Based on the data [8]

Стоимость годового импорта ферромарганца составляла 51–86 млн \$ США в 1996–2007 гг., ажиотажный всплеск в 108 млн \$ США в 2008 г., 55–80 млн \$ США/год в 2009–2013 гг. и падение до 27 млн \$ США в 2018 г. (рис. 3, *a*). Доля стоимости ферромарганца в 1996–2002 гг. от суммы стоимости марганцевых продуктов составляла 25–50 %, но в дальнейшем она начала снижаться, вплоть до 3,5 % в 2018 г. (рис. 3, *b*).

Динамика мировых цен на ферромарганец (рис. 6, *b*) включает следующие события: стабильный уровень 425–530 \$ США/т в период 1996–2003 гг.; рост цен в 2003–2008 гг. до аномального уровня в 2105 \$ США/т (начался ранее роста цен на марганцевые руды); резкий спад цены в 2009 г. до 1245 \$ США/т и тренд падения цен в 2010–2016 до 730 \$ США/т. В 2017 г. начался новый рост цен на ферромарганец – до 1330 \$ США/т. Российские цены импорта ферромарганца в периоды 1996–2003 и 2013–2017 гг. были несколько выше (5–15 %) среднемировых экспортных цен, но в период неупорядоченности цен 2004–2012 гг. – на 10–50 % ниже мировых. Экспортные российские цены практически повторяют тренд среднемировой экспортной цены, но ниже их на 5–10 %, а по отношению к российским ценам импорта в период неупорядоченности цен 2004–2012 гг. – на 16–85 % выше их уровня, а начиная с 2013 г. – на 10–15 % ниже.

На фоне снижения объемов импорта ферромарганца начиная с 2002 г. появился встречный поток российского экспорта этого ферросплава (до 60 тыс. т [38 % от производства] в 2007 г.) [18]. В результате

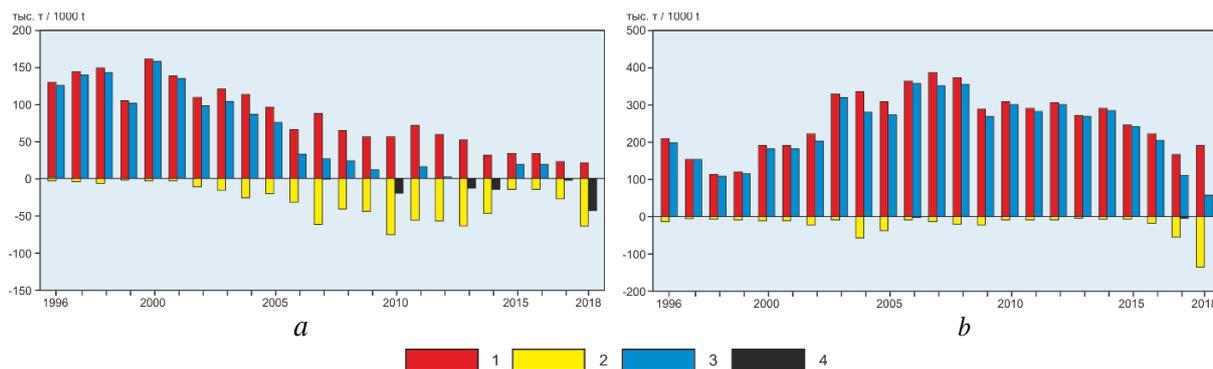
Доля импорта ферромарганца упала с 57–77 % в 1996–2004 гг. до 10 % в 2018 г. (рис. 4), т. е. этот минеральный продукт вышел из категории высокой импортозависимости в статус *импортной независимости* [16].

Экспорт ферромарганца (до 75 тыс. т в 2010 г.) осуществлялся в основном в Нидерланды, Турцию, Казахстан и Алжир, а также в виде встречных потоков – на Украину (рис. 7, *a*). Объемы экспорта и состав контрагентов покупки определялись текущей рыночной ситуацией и крайне неупорядочены.

этого возник искусственный дефицит ферромарганца для компенсации экспортного потока. Появился формальный *нетто-экспорт* ферромарганца, максимально составивший 41,4 тыс. т (191 % от импорта и 19 % от потребления) в 2018 г. (рис. 8, *a*). Причиной возникновения встречных импортно-экспортных потоков являются собственные коммерческие интересы независимых ферросплавных заводов, рассматривающих рынок ферросплавов шире национальных интересов производства стали и находящихся большую выгоду от экспортных поставок.

В динамике рынка *силикомарганца* (рис. 2, *c*) его производство имеет тенденцию к росту с 50 тыс. т (20 % от национального потребления) в 1997 г. до 353 тыс. т в 2018 г. (46 % от потребления) со среднегодовым приростом +9,3 %. В 2003–2006 гг. имело место уменьшение производства силикомарганца без снижения его потребления ввиду падения мировых цен на этот продукт. Потребление силикомарганца растет со 170 тыс. т в 1998 г. до максимума 497 тыс. т в 2007 г., просаживается во время кризиса 2008 г. до 368 тыс. т, в дальнейшем же составляет 410–460 тыс. т/год. Среднегодовой рост потребления ферросилиция составил +3,7 %.

Импорт силикомарганца (рис. 4, *c*) в период низких цен на него, до 2007 г., имел тенденцию роста (с 115 до 430 тыс. т/год со среднегодовым ростом +6,9 %), начиная с 2008 г. объемы импорта снизились, до 167 тыс. т в 2017 г. со среднегодовым темпом изменения объемов в –9,2 %. Но в целом среднегодовые изменения импорта силикомарганца за 1996–2018 гг. составили –1,1 %.



**Рис. 8.** Динамика объемов нетто-импорта и нетто-экспорта ферромарганца (а) и силикомарганца (b) за 1996–2018 гг.: 1 – импорт, 2 – экспорт, 3 – нетто-импорт, 4 – нетто-экспорт

**Fig. 8.** Dynamics of volumes of net imports and net exports of ferromanganese (a) and silicomanganese (b) for 1996–2018: 1 – import, 2 – export, 3 – net import, 4 – net export

Стоимость импортного потока силикомарганца в 1999–2003 гг. составляла 60–120 млн \$ США/год, с 2004 г. начался ее рост до максимума в 641,5 млн \$ США в 2008 г., после чего началось снижение импорта на фоне высоких цен, что и привело к падению стоимости импорта вплоть до 160–220 млн \$ США/год к 2016–2018 гг. (рис. 3, а). Доля стоимости импорта силикомарганца наибольшая среди марганцевых продуктов (в среднем 49,5 %), в 2004–2008 гг. она достигала 60–64 %, но в дальнейшем доля стоимости начала снижаться вплоть до 29,5 % в 2018 г. (рис. 3, б).

Поставки силикомарганца осуществлялись преимущественно с Украины (до 240 тыс. т/год), но с 2014 г. они начали сокращаться и в 2017 г. прекратились (рис. 5, с). Замещение вышедшего потока этого ферросплава компенсировалось увеличением поставок из Казахстана и, особенно, из Грузии (до 114 тыс. т/год).

Экспорт силикомарганца (2–66 тыс. т/год или 1–22 % от производства) неоднороден во времени, наибольшие поставки осуществлялись преимущественно в Нидерланды и Беларусь, а также встречный поток в Казахстан (рис. 7, б). Всплески объемов экспорта силикомарганца в 2004–2005 и 2017–2018 гг. (до 75 % от производства) обусловлены высокими мировыми ценами на него в эти периоды.

Как и в случае с ферромарганцем для силикомарганца появился встречный экспортный поток: в 2002–2009 гг. – от 10 до 56 тыс. т/год (20–75 % от производства), а в 2016–2018 гг. – до 133 тыс. т/год (15–37 % от производства). Тем не менее отрицательный нетто-экспорт ни разу не возник, лишь нетто-импорт иногда уменьшается до 29 % от объемов импорта или 14 % от потребления (2018 г.) (рис. 8, б).

Динамика мировых цен на силикомарганец (рис. 6, с) включает следующие события: стабильный уровень 410–550 \$ США/т в 1996–2002 гг.; рост цен в 2003–2008 гг. до аномального уровня в 1772 \$ США/т; резкий спад цены в 2009 г. до 978 \$ США/т, затем стабилизация цен на уровне 1030–1170 \$ США/т в 2010–2018 гг. с просадкой в 2016 г. до 730 \$ США/т. Российские цены импорта силикомарганца в 2002–2014 гг. были ниже среднемировых, иногда на 20–25 % (2003–2004 гг.), но начиная с 2015 г. стали

их превышать на 10–18 %. Цены экспорта силикомарганца были преимущественно выше его импортных цен: в 2000–2003 гг. – на 10–20 %, в 2004–2016 гг. – на 20–40 %. В 2017–2018 гг. цены экспорта и импорта силикомарганца примерно равны.

Доля импорта силикомарганца находилась на уровне 65–74 % в 1996–2002 гг., на уровне 81–88 % в 2003–2008 гг., а с 2009 г. началось ее падение до 36 % в 2017 г. (рис. 4).

В анализируемом периоде наблюдается прогрессирующий рост потребления марганца металлического (рис. 2, d) с 4 тыс. т в 2000 г. до 68 тыс. т в 2018 г. со среднегодовыми темпами роста +12,2 %. В России металлический марганец в промышленных масштабах в настоящее время не производится и полностью обеспечивается импортными поставками. Стоимость импортного потока марганца металлического увеличилась с 4 млн \$ США в 2000 г. до 151 млн \$ США в 2018 г. (рис. 3, а). Доля стоимости импорта марганца металлического от стоимости марганцевых продуктов также увеличилась с 1,9 % в 2000 г. до 19,6 в 2018 г. (рис. 3, б).

Импорт марганца металлического осуществлялся преимущественно из Китая (до 63 тыс. т/год), (рис. 5, d). Экспорт марганца металлического отсутствует.

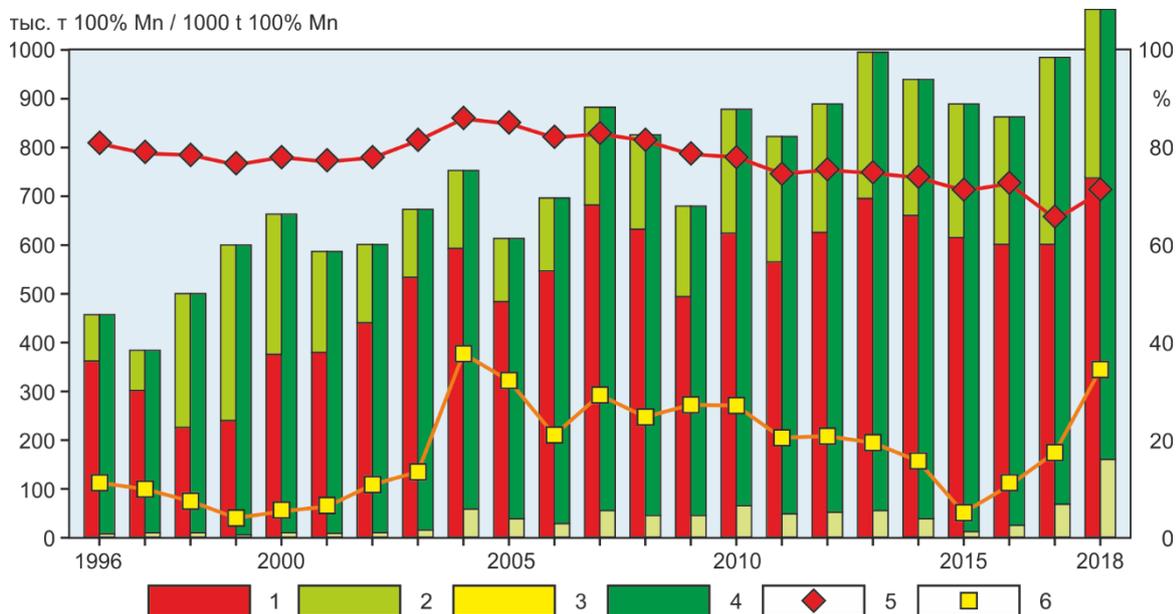
В динамике стоимости импорта металлического марганца имеется тенденция роста с 1–4 млн \$ США/год в 1996–2000 гг. до 130 млн \$ США в 2017 г., со среднегодовым ростом +18,4 %/год (рис. 3, а).

Динамика мировых цен на металлический марганец (рис. 6, d) включает тренд падения с 1770 \$ США/т в 1996 г. до 1110 \$ США/т в 2003 г.; рост цен до 3210 \$ США/т в 2011 г. (с аномальным всплеском до 3660 \$ США/т в 2008 г.) и тренд падения цен вплоть до минимума 2117 \$ США/т в 2016 г. Цены импорта металлического марганца были значительно ниже мировых, но в последние годы они выросли до равенства с последними.

В целом можно констатировать, что марганцевый концентрат и металлический марганец являются полностью импортозависимыми продуктами, силикомарганец – умеренно импортозависимым, а ферромарганец – импортнезависимым (рис. 4) [16]. Но в целом динамику импортозависимости суммы всех

видов марганцевого сырья можно оценить, приведя их данные в пересчете на условный продукт – 100 % марганца (рис. 9). Как видно из динамики суммы всех видов марганцевого сырья, его производство имеет тенденцию к росту +7,5 %/год при росте потребления в +3,9 %/год. Объемы импорта также имеют среднегодовой рост +3,3 %. Доли импорта от потребления и

от реализации составляют от 66 до 86 %, при небольшой тенденции к падению (–0,5 % отн/год). Таким образом, марганцевое сырье в сумме всех видов является значительно импортозависимым. На экспорт отправляется от 4 до 35 % оперируемых объемов суммы марганцевых продуктов с тенденцией к увеличению (+12,0 % отн/год).



**Рис. 9.** Динамика объемов суммы марганцевых продуктов (в пересчете на 100 % Mn) в России и долей их импорта и экспорта за 1996–2018 гг.: 1 – импорт, 2 – производство, 3 – экспорт, 4 – нетто-потребление, 5 – доля импорта от потребления, 6 – доля экспорта от производства

**Fig. 9.** Dynamics of volume of manganese amount products (in recalculation on 100 % Mn) in Russia and the share of imports and exports for 1996–2018: 1 – import, 2 – manufacturing, 3 – exports, 4 – net consumption, 5 – import share of consumption, 6 – export share of production

По состоянию на 2017 г. на импорт приходится 100 % потребления марганцевых руд и концентратов (1318 тыс. т на сумму 365 млн \$ США), 19 % – ферромарганца (21 тыс. т на сумму 27 млн \$ США), 46 % – силикомарганца (192 тыс. т на сумму 227 млн \$ США) и 100 % – марганца металлического (68 тыс. т на сумму 151 млн \$ США). Стоимость потока суммы марганцевых продуктов медленно растет во времени

с 163 млн \$ США в 1999 г. до 338 млн \$ США в 2006 г., в кризисный 2008 г. достигает 1113 млн \$ США, затем провал до 464 млн \$ США в 2009 г., в 2010–2018 гг. суммарная стоимость годового потока марганцевого сырья составляла 585–625 млн \$ США с кризисным максимумом в 2008 г. (рис. 3, а). Среднегодовой рост стоимости суммы импорта марганцевых продуктов за 1996–2018 гг. составил +6,9 %/год.

**Таблица.** Темпы среднегодовых изменений показателей товарных потоков марганцевого сырья за 1996–2018 гг., % отн./год.

**Table.** Rates of average annual changes in indicators of commodity flows of manganese raw materials for 1996–2018, %.

Параметры Parameters	Марганцевые руды Manganese ore	Ферромарганец Ferromanganese	Силикомарганец Silicomanganese	Марганец металлический Metal manganese	Сумма марганцевых продуктов Sum of manganese products
Объемы производства Production volume	–	+6,5	+9,3	–	+7,5
Объемы импорта Volume of imports	+7,4	–7,8	–0,4 (2008–2018 гг. –7,2)	+12,2	+3,3
Объемы потребления Volume of consumption	+7,2	+0,6	+5,3	+12,2	+3,9
Цена импорта Imports price	+16,0	+5,5	+4,6	+8,2	–
Стоимость импорта Cost of imports	+15,1	–4,4	+2,8	+18,4	+6,9
Доля импорта Share of imports	+0,2	–3,9	–2,0	–	–0,5

По темпам изменений показателей товарных потоков марганцевого сырья за 1996–2018 гг. (таблица):

- максимальный рост темпов объемов потребления ожидаемо имеет место для марганца металлического (+18,4 %/год), но его доля в общем потреблении марганцевых продуктов в 2018 г. составляет всего 6,1 %;
- максимальный рост цены импорта наблюдается для марганцевых руд и концентратов (+16,0 %), а т. к. они составляют основную долю марганцевых продуктов (51,3 % в 2018 г.), то на них и приходится большая часть стоимости суммарного импорта (рис. 3) и рост темпов объемов импорта и потребления выше среднего по всем марганцевым продуктам;
- темпы снижения объемов импорта ферромарганца (–7,8 %) выше темпов увеличения его производства (+6,5 %), что и позволило перевести этот товарный продукт из полностью импортозависимого в импортонезависимую категорию;
- темпы роста объемов производства силикомарганца выше средних по марганцевым продуктам (+9,3 % > +7,5 %), но снижение темпов объемов импорта небольшие (–0,4 %), т. е. ситуация с импортозамещением главного марганцевого ферросплава остается неопределенной.

#### Пути решения проблемы дефицита марганцевого сырья

Предполагается, что к 2030 г. потребление марганцевой продукции в результате дальнейшего развития российской сталелитейной промышленности может вырасти на 50 % [19]. Поэтому в ближайшем будущем черная металлургия страны не сможет обойтись без импорта марганцевого сырья и продукции, однако требуется серьезное упорядочение и стабилизация импортных поставок марганцевого концентрата и ферросплавов [20].

Решение проблем марганцевого импортного сырья возможно в следующих направлениях:

1. Поиски и освоение новых промышленно значимых месторождений высококачественного марганцевого сырья.
2. Разработка и внедрение новых технологий добычи и обогащения марганцевых руд, а также производства марганцевых ферросплавов.
3. Стабилизация импортных поставок марганцевого сырья.

*1. Поиски и освоение новых месторождений марганца.* Месторождения марганца на территории России [21] ввиду наличия на территории СССР уникальных никопольских месторождений на юге Украины и месторождений высококачественных руд в Грузии, исследовались ранее по остаточному принципу – проявления и месторождения марганцевых руд фиксировались, изредка оценивались, крайне редко разведывались и разрабатывались. Лишь во время Великой Отечественной войны были интенсифицированы работы по изучению марганцевых месторождений Урала, Сибири и Дальнего Востока,

было разведано Усинское месторождение в Кемеровской области, разрабатывалось Мазульское месторождение в Красноярском крае. К настоящему времени на территории России известно более 50 месторождений марганца, из которых периодически разрабатывались Парнаокское, Тыньинское, Дурновское и Громовское месторождения. Разработка и внедрение новых ресурсо- и энергосберегающих технологических схем обогащения руд и получения марганцевых сплавов (включая ферросплавы из бедного и фосфорсодержащего сырья) может позволить отрабатывать уже подготовленные месторождения (крупнейшие в России) – Усинское в Кемеровской области, Южно-Хинганского в Еврейской АО и Порожинское в Красноярском крае (рис. 1).

Крупнейшее в России Усинское месторождение в Кемеровской области представлено в основном карбонатными рудами (свыше 120 млн т руды или 23 млн т 100 % Mn), вследствие чего оператор проекта разработки ЧЕК-СУ ориентируется на переработку этих руд на металлический марганец на базе Туимского завода цветных металлов в Республике Хакасия с годовым выпуском до 70 тыс. т, что перекроет национальную потребность в этом продукте [6, 22, 23].

Южно-Хинганское месторождение преимущественно оксидных руд (8 млн т руды или 1,6 млн т 100 % Mn), расположенное в Еврейской ОА, подготавливается к освоению китайской компанией ООО «Хэмэн Дальний Восток», планируемые объемы годовой добычи марганцевой руды – до 300 тыс. т [6]. Но товарный поток с этого месторождения, скорее всего, пойдет в Китай – более удобный по логистике потребитель марганцевого сырья.

Порожинское месторождение в Красноярском крае является крупнейшим из подготовленных в России месторождений оксидных руд (29 млн т руды или 5,5 млн т 100 % Mn) [24], но оно расположено вне доступной транспортной инфраструктуры. Осуществлялись попытки его освоения (ООО «Туруханский меридиан»), но до начала выпуска товарной руды дело так и не дошло.

Суммарные подготовленные запасы марганцевого сырья в России составляют 232,8 млн т (A+B+C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub>), но большая их часть приходится на бедные и технологически сложные руды, а многие месторождения находятся далеко от развитой транспортной инфраструктуры [6]. Тем не менее обнаружение новых марганцевых месторождений в связи с относительно слабой опосредованностью территорий на марганец возможно практически во всех марганцевоносных провинциях России, но предпочтительнее все же находки в районах с развитой инфраструктурой – в Северо-Кавказской [2], Южно-Уральской [25], Средне-Уральской [26], Полярно-Уральской [27], Салаирско-Кузнецкой и Енисейской [28], Прибайкальской [2], Забайкальской [29], Хинганской и Средне-Амурской [30] провинциях. Интерес для поисков должны представлять крупные месторождения высококачественного сырья близ имеющихся транспортных коммуникаций.

*Вторым возможным направлением* пополнения минерально-сырьевой базы марганца России является вовлечение в производство месторождений железомарганцевых конкреций глубоководного дна Мирового океана [31–33]. В Тихом Океане, в рудном поле Кларион-Клипперон, за Россией Международным органом по морскому дну (МОД) при ООН закреплен участок морского дна для разведки и добычи железомарганцевых конкреций площадью 75 тыс. км<sup>2</sup> со средней плотностью конкреций 50–70 кг/м<sup>2</sup>, содержащих в среднем 29,4% Mn. Помимо этого, Российская Федерация является участником совместной организации Interoseanmetal Joint Organization (ИОМ) (Болгария, Куба, Чехия, Польша, Россия, Словакия), которой также выделен участок с месторождением железомарганцевых конкреций в этой же зоне Кларион-Клиппертон. Уже осуществлены пробные отработки морского дна, подтверждающие техническую возможность и экономическую рентабельность этих проектов. Минимально промышленная концентрация железомарганцевых конкреций на морском дне определена в 5 кг/м<sup>2</sup>. По первому участку морского дна России предоставлена квота годовой добычи до 3,5 млн т конкреций в год, что эквивалентно выпуску до 1 млн т марганцевых ферросплавов. Однако до сих пор проекты разработки минеральных ресурсов морского дна остаются малопривлекательными для инвесторов ввиду высоких рисков их осуществления:

- при отсутствии опыта промышленной разработки минеральных ресурсов глубинного морского дна в реальных условиях, с обеспечением непрерывности и равномерности сбора железомарганцевых конкреций, их подъема на морские суда, перегрузки на транспортные суда, особенно при неблагоприятной метеобстановке в районе разработок;
- технологических сложностях переработки железомарганцевых конкреций на товарные марганцевые продукты ввиду наличия попутных полезных компонентов, подлежащих извлечению для последующей реализации;
- необходимости выплаты кроме национальных налогов дополнительного налога в пользу Международного органа по морскому дну или International Seabed Authority (МОМД или ISA) ООН (ст. 13 прил. III «Конвенции ООН по морскому праву» [34]).

Тем не менее в настоящее время 13 организаций Китая, Японии и России проводят работы по оценке и опытно-промышленной эксплуатации месторождений железомарганцевых конкреций на участках морского дна, закрепленных за этими странами [3].

Принципиальное решение по освоению месторождений железомарганцевых конкреций дна Мирового океана полностью бы закрыло проблему импортных поставок марганцевого сырья в Россию, но такое возможно только в рамках крупного национального проекта в условиях достаточности финансирования инвестиций.

*2. Разработка новых технологий.* Сокращение ресурсов богатых марганцевых руд привело к необхо-

димости обогащения бедных их разностей до товарного вида – марганцевого концентрата. Необходимо получение товарного продукта, содержащего свыше 34 % Mn (I сорт – не менее 43 % Mn), с отношением Mn/Fe >7 и отношением P/Mn <0,0035. Главный показатель – содержание Mn в концентрате и его повышение на 1 % эквивалентно экономии 40 кВт·ч. Используются традиционные схемы мокрой гравитационной и магнитной сепарации, флотации шламов, а также новые – получение синтетического пиролюзита хемосорбционного концентрата оксида марганца.

Применение новых методов обогащения может позволить получать из труднообогатимых руд товарные марганцевые концентраты с более низким уровнем издержек и получением более качественных продуктов. К ним следует отнести:

- энергоэкономные способы обогащения минерального сырья: рентгенорадиометрический (РРМ), фотометрический (ФМ) и рентгенолюминесцентный (РЛМ). ФМ испытан на рудах Никопольского месторождения, сочетание РРМ и ФМ – на рудах Тыньинского месторождения, РРМ – на предварительной сортировке руд Порожинского месторождения [35–37];
- использование при магнитной сепарации энергоэкономных высокоградиентных постоянных магнитов [36];
- химическое выщелачивание марганца из недробленных бедных руд [37–39];
- биовыщелачивание марганца из шламов и отвалов обогащения [40];
- производство синтетического марганцевого сырья (синтетического пиролюзита) [41].

Возможно использование в разработке марганцевых и новых горных технологий:

- скважинная гидродобыча рыхлых марганцевых руд [42];
- подземное химическое [37, 38] и бактериальное [40] выщелачивание марганца из глубоких (недоступных) горизонтов марганцевых руд.

При переработке марганцевых руд на ферросплавы также возможно применение новых материало- и энергосберегающих технологий:

- передел на ферросплавы бедных марганцевых руд [43–46];
- производство ферросплавов из карбонатных марганцевых руд [23, 38];
- гидрометаллургические [46] и газовые [47] технологии производства ферросплавов;
- снижение вредных примесей в марганцевых ферросплавах [48];
- снижение энергоемкости ферросплавной продукции [49];
- производство новых видов марганцевых ферросплавов [50].

Таким образом, имеются все предпосылки для снижения издержек производства добычи и обогащения руд марганцевых месторождений, а также выпуска марганцевых ферросплавов.

3. *Стабилизация импортных поставок.* В ближайшее время вряд ли возможно существенное замещение импортных поставок марганцевого сырья. Поэтому проблеме их стабилизации следует уделить главное внимание.

Основными поставщиками марганцевого концентрата в Россию являются казахстанские предприятия – Жайремский ГОК и рудник Джезды, управляемый холдингом «Казахмарганец». Поставщиками ферросплавов являются Никопольский и Запорожский ферросплавные заводы с Украины, казахстанские ферросплавные заводы «Аксу» и «Феррохром» холдинга «Казхром», Зестафонский завод ферросплавов в Грузии, ферросплавные заводы в г. Саннефьорде (Норвегия) и г. Дюнкерк (Франция). Казахстанские источники марганцевого сырья предпочтительны в части относительной дешевизны поставляемых продуктов, отсутствия взимания ввозной пошлины (как страны Таможенного Союза) и небольших транспортных расходов по доставке материалов к месту потребления. Этот устойчивый транспортный поток марганцевого концентрата следует поддерживать, в том числе и на государственном уровне. Например, через механизм регулирования цен естественных монополий (ОАО «Российские железные дороги») государство имеет возможность установить регулируемые тарифы на перевозку этого дефицитного сырья.

Углубление экономических связей стран БРИКС способствовало появлению на российском рынке нового потока марганцевого сырья от мирового лидера добычи марганцевых руд – Южно-Африканской Республики [51], а также из Габона с его месторождений высококачественных марганцевых руд. Российская группа компаний «Ренова» создала в ЮАР консорциум United Manganese of Kalahari (UMK) для совместной разведки, добычи и переработки марганцевых руд (доля ГК «Ренова» – 49 %). Объемы добычи марганцевых руд этого предприятия на рудном поле Калахари превышает 3 млн т/год, и до 500 тыс. т/год экспортируется в Россию. Следует также поддерживать стабильность поставок из этого источника.

#### Выводы

1. Импортозависимость по марганцевым рудам по состоянию на 2018 г. составляет 100 % от потребления (импортировано 1318 тыс. т), по силикомарганцу – 46 % (импорт 192 тыс. т), по марганцу металлическому – 100 % (импорт 68 тыс. т) и по ферромарганцу – 10 % (импорт 21 тыс. т). Суммарно в 2018 г. импортировано 1,6 млн т марганцевых продуктов, что составляет 72 % от их потребления. Среднегодовое снижение доли импорта в потреблении суммы марганцевых продуктов в 1996–2018 гг. составляло всего –0,5 %/год, при этом доля импорта марганцевых руд и концентратов росла с темпами +0,2 %/год.
2. Марганцевые руды и концентраты являются абсолютно импортозависимым товарным продуктом (100 % импорта от потребления). Даже ввод в эксплуатацию крупнейшего в России Усинского месторождения решит проблему обеспечения лишь 12 % марганцевого ферросплавного производства. Порожинское месторождение находится вне доступной транспортной инфраструктуры и вряд ли в ближайшем будущем будет освоено. Не наблюдается и новых открытий в поисках месторождений марганцевого сырья. Потребление марганцевого концентрата увеличилось с 285 тыс. т в 1996 г. до 1,3 млн т в 2018 г. (+7,2 %/год). В ближайшем будущем черная металлургия страны не сможет обойтись без импорта марганцевого концентрата, и поэтому требуется серьезное упорядочение импортных поставок марганцевого концентрата, стабилизация их потоков, как традиционного – из Казахстана (в рамках Таможенного союза), так и от новых стран-партнеров – Южно-Африканской Республики (в рамках союза стран БРИКС) и Габона. Стабилизации надежного импорта в Россию марганцевого сырья способствуют и российские инвестиции в зарубежные марганцедобывающие и ферросплавные предприятия.
3. Национальное потребление силикомарганца увеличилось с 170 тыс. т в 1998 г. до 455 тыс. т в 2017 г. (+5,3 %/год), а производство возросло с 50 до 355 тыс. т/год (+6,5 %/год). Тем не менее объемы импорта силикомарганца остались на прежнем уровне – 170–190 тыс. т/год, а в 2003–2008 гг. они составляли 310–435 тыс. т/год, т. е. начиная с 2008 г. темпы снижения объемов импорта силикомарганца составляли –7,2 %/год. Сократившийся импорт с Украины замещен поставками из Грузии, Казахстана и Норвегии. Но пока еще силикомарганец является импортозависимым товаром.
4. Национальное потребление ферромарганца увеличилось незначительно – с 193 тыс. т в 1996 г. до 262 тыс. т в 2017 г. (+0,6 %/год), причем объемы производства резко возросли с 50 до 260 тыс. т/год (+6,5 %/год). Объемы импорта ферромарганца при этом серьезно сократились с 130 до 21 тыс. т/год (–3,9 %/год). Поэтому ферромарганец за последние годы вышел из полной импортной зависимости в импортнезависимую категорию.
5. Появился спрос на новый товарный продукт – марганец металлический, потребление которого выросло с 0,3 тыс. т в 1996 г. до 68 тыс. т в 2018 г. (+12,2 %/год). В настоящее время потребность в нем покрывается за счет импорта. После ввода в эксплуатацию Усинского месторождения и Туимского завода производство металлического марганца полностью перекроет национальное потребление.
6. На фоне тотального импорта марганцевых ферросплавов появилось явление встречной импортно-экспортной торговли (экспорт до 63 тыс. т/год ферромарганца и до 133 тыс. т/год силикомарганца), вплоть до формирования направления нетто-экспорта ферромарганца до 41 тыс. т/год ферромарганца.
7. Первоочередные поиски новых месторождений марганца предпочтительно организовывать на недостаточно исследованных территориях вдоль новых железнодорожных магистралей (Байкало-Амурской и Амуро-Якутской) в пределах Прибайкальской, Забайкальской и Усть-Майской марганценосных провинций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марганец. Минерально-сырьевая база СНГ. Добыча и обогащение руд / К.Н. Трубецкой, В.А. Чантурия, А.Е. Воробьев, Л.П. Тигунов. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1999. – 271 с.
2. Тигунов Л.П. Состояние и перспективы развития сырьевой базы черной металлургии. Марганцевые руды // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 1994. – № 4. – С. 14–19.
3. Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply / K.J. Schulz, J.H. DeYoung, R.R. Seal, D.C. Bradley. – Reston: U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey. – 2017. – 862 p. URL: [https://pubs.usgs.gov/pp/1802/pp1802\\_entirebook.pdf](https://pubs.usgs.gov/pp/1802/pp1802_entirebook.pdf) (дата обращения: 06.10.2019).
4. Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets / Written by Deloitte Sustainability; British Geological Survey; Bureau de Recherches Géologiques et Minières; Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. – 2017. – 515 p. URL: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1> (дата обращения: 06.10.2019).
5. Public annual market research report [Manganese] // International Manganese Institute (IMI). 2016. 92 p. URL: [https://www.manganese.org/files/publications/PUBLIC%20RESEARCH%20REPORTS/2013\\_IMnI\\_Public\\_Report.pdf](https://www.manganese.org/files/publications/PUBLIC%20RESEARCH%20REPORTS/2013_IMnI_Public_Report.pdf) (дата обращения: 06.10.2019).
6. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016–2017 годах». URL: [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения 06.10.2019).
7. Федеральная служба государственной статистики России. URL: <https://gks.ru/emiss> (дата обращения: 06.10.2019).
8. Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.ru/analytics/> (дата обращения: 06.10.2019).
9. Международная торговля товарами. TrendEconomy. URL: <http://data.trendeconomy.ru/dataviewer/trade/statistics/> (дата обращения: 06.10.2019).
10. Информационно-аналитический центр «Минерал» URL: <http://www.mineral.ru/Center/index.html> (дата обращения: 06.10.2019).
11. Tangstad M. Manganese ferroalloys technology (Book Chapter) / Handbook of ferroalloys. – Oxford (UK); Waltham (USA): Butterworth-Heinemann, 2013. – P. 221–266. DOI: 10.1016/B978-0-08-097753-9.00007-1.
12. Колоскова И.С. Структура производства и рынок марганцевого сырья в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2014. – № 1. – С. 74–77.
13. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Y., Yusfin Y.S. Manganese-ferroalloy production from Russian manganese ore // Steel in Translation. – 2014. – V. 44. – № 9. – P. 617–624. DOI: 10.3103/S0967091214090125.
14. Ferroalloy production in Russia / L.I. Leontev, V.I. Zhuchkov, A.V. Zhdanov, V.Y. Dashevskii // Steel in Translation. – 2015. – V. 45. – № 10. – P. 773–777. DOI: 10.3103/S0967091215100101.
15. Лаптева А.М., Митрофанов Н.П., Тигунов Л.П. Минерально-сырьевая база легирующих металлов: состояние, проблемы и перспективы освоения // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 10–16. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.02.
16. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю. Товарные потоки ферросплавов в России // Черные металлы. – 2018. – № 3. – С. 60–69.
17. Dashevskii V.Y., Zhuchkov V.I., Leontev L.I. Utilization of manganese in Russian metallurgy // Steel in Translation. – 2019. – V. 49. – № 1. – P. 50–57. DOI: 10.3103/S0967091219010042.
18. Хатьков В.Ю., Боярко Г.Ю. Мировые и российские встречные импортно-экспортные потоки минерального сырья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 145–167.
19. Стратегия развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года / Утв. Приказом Минпромторга России от 05.05.2014 № 839. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (дата обращения: 06.10.2019).
20. Ходина М.А. Российский рынок марганцевой продукции и потенциальные возможности ее импортозамещения // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 2. – С. 42–48.
21. Марганцевое рудообразование на территории СССР / под ред. Д.Г. Сапожникова. – М.: Наука, 1984. – 280 с.
22. Вальшиков А.В., Литвиненко А.П., Делер М. Проект освоения Усинского месторождения марганца. Технология обогащения руды // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2011. – № 3. – С. 80–83.
23. Production of manganese ferroalloys from Usinsk manganese ore / V.Y. Dashevskii, Y.S. Yusfin, G.S. Podgorodetskii, N.V. Baeva // Steel in Translation. – 2013. – V. 43. – № 9. – P. 544–551. DOI: 10.3103/S0967091213090052.
24. Примак В.С., Небогов В.К., Спиридонова Е.Л. Перспективы освоения Порожинского месторождения марганца в Красноярском крае // Горный журнал. – 2006. – № 8. – С. 23–27.
25. Салихов Д.Н., Ковалев С.Г., Брусницын А.И. Полезные ископаемые Республики Башкортостан (марганцевые руды). – Уфа: Институт геологии УНЦ АН Республики Башкортостан, 2002. – 243 с.
26. Контарь Е.С. Марганцевые месторождения Урала. – Екатеринбург: КИП по Свердловской области, 1999. – 118 с.
27. Марганцевоносность Полярного Урала / Б.Ф. Костюк, Л.А. Островский, В.Н. Пенчук, А.Л. Ильюшинов // Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем: Материалы первой научно-технической конференции. – Екатеринбург: Изд-во Екатеринбургской ассоциации малого бизнеса, 2000. – С. 93–98.
28. Цыкин Р.А. Гипергенные марганцевые руды Центральной Сибири // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2008. – Т. 1. – № 1. – С. 3–16.
29. Вахрушев В.А., Павленко Ю.В. Читинская область – новая потенциальная марганцеворудная провинция России // Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем: Материалы первой научно-технической конференции. – Екатеринбург: Изд-во Екатеринбургской ассоциации малого бизнеса, 2000. – С. 116–123.
30. Черепанов А.А. Марганцевые руды Дальнего Востока // Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем: Материалы первой научно-технической конференции. – Екатеринбург: Изд-во Екатеринбургской ассоциации малого бизнеса, 2000. – С. 134–136.
31. Железомарганцевые образования мирового океана и морского шельфа – минеральное сырье многоцелевого назначения / Л.З. Быховский, Л.П. Тигунов, И.М. Мирчинк, В.Б. Терентьев // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2009. – № 2. – С. 17–24.
32. Metal extraction from deep-ocean mineral deposits / M.V. Zubkov, P.K. Plucinski, A.C.Y. Dartiguelongue, P.A.J. Lusty // Elements. – 2018. – V. 14. – № 5. – P. 319–324. DOI: 10.2138/gselements.14.5.319.
33. Lusty P.A.J., Murton B.J. Deep-ocean mineral deposits: metal resources and windows into earth processes // Elements. – 2018. – V. 14. – № 5. – P. 301–306. DOI: 10.2138/gselements.14.5.301.
34. Конвенция ООН по морскому праву / Совершено в Монтего-Бее 10 декабря 1982 г. (с изм. от 23.07.1994) // Бюллетень международных договоров. – 1998. – № 1. – С. 3–168.
35. Современные технологии в эффективном освоении и развитии МСБ твердых полезных ископаемых России / А.А. Рогожин, А.В. Темнов, Л.П. Тигунов, Н.В. Петрова, А.Д. Коноплев // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 7. – С. 33–41.
36. Тигунов Л.П., Ожогина Е.Г., Литвинцев Э.Г., Бронницкая Е.С., Ануфриева С.И., Калиш Е.А. Современные технологии обогащения и гидрометаллургического передела марганцевых руд // Горный журнал. – 2007. – № 2. – С. 78–84.
37. Chernobrovina V.P., Mizin V.G., Sirina T.P. Production of high-quality manganese concentrates from carbonate ores // Steel. – 2005. – № 1. – P. 53–55.
38. Комплексная переработка карбонатного марганцевого сырья: химия и технология / В.П. Чернобровин, В.Г. Мизин, Т.П. Сирина, В.Я. Дашевский. – Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2009. – 293 с.
39. Перспективы применения технологии кучного выщелачивания для переработки труднообогатимых марганцевых руд /

- В.Н. Соколова, С.И. Ануфриева, А.В. Темнов, О.С. Борзых, О.А. Якушина // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 8. – С. 44–49.
40. Das A.P., Ghosh S. Bioleaching of manganese from mining waste materials // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – V. 5. – № 1. – P. 2381–2390. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.459.
41. Zhukov D.Y., Averina Y.M. Development of a pyrometallurgical technology for processing synthetic pyrolusite and chemisorption manganese oxide concentrate into metallic manganese and low-carbon ferroalloys // *CIS Iron and Steel Review*. – 2019. – V. 17. – P. 25–29. DOI: 10.17580/cisirs.2019.01.04.
42. Комплексное освоение недр способом скважинной гидродобычи / В.И. Стрельцов, Ю.И. Волков, А.Г. Балашов, Т.П. Стрельцова // *Горный журнал*. – 2010. – № 7. – С. 33–36.
43. Improving manganese utilization in the production of manganese ferroalloys / V.Ya. Dashevskij, Yu.S. Yusfin, A.A. Aleksandrov, L.I. Leontev, G.S. Podgorodeckij, V.I. Gubanov // *Steel in Translation*. – 2013. – № 7. – P. 32–37. DOI: 10.3103/S0967091213070036.
44. Complex processing of manganese bearing waste and low-grade ores by autoclaving method / A. Chirakadze, L. Gurchemelia, I. Khomeriki, W.A. Toscano, I. Bazghadze, I. Geleishvili, V. Gvakharia, T. Geleishvili // *International journal of global warming*. – 2016. – V. 10. – № 1. – P. 291–306. DOI: 10.1504/IJGW.2016.077919.
45. Calculations of manganese ferroalloys production efficiency from different ores / V.I. Zhuchkov, A.V. Zhdanov, L.I. Leontev, V.Y. Dashevskii // *Steel in Translation*. – 2016. – V. 46. – № 11. – P. 814–817. DOI: 10.3103/S0967091216110139.
46. Zhukov D.Y., Averina Y.M., Menshikov V.V. Design of a hydrometallurgical complex for processing of complex low-grade manganese ores // *CIS Iron and Steel Review*. – 2018. – V. 16. – P. 4–10. DOI: 10.17580/cisirs.2018.02.01.
47. Kinetics and mechanism of low-grade manganese ore reduction by natural gas / A. Cheraghi, H. Yoozbashizadeh, E. Ringdalen, J. Safarian // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2019. – V. 50. – № 4. – P. 1566–1580. DOI: 10.1007/s11663-019-01574-4.
48. Han P., Zhang G., Chu S. Reducing dephosphorization of silicomanganese ferroalloys by CaO-based slag // *Metallurgical Research and Technology*. – 2017. – V. 114. – № 6. – Article number 605. DOI: 10.1051/metal/2017020.
49. Tleugabulov S.M., Tazhiev E.B. Energy-saving ferroalloy production // *Steel in Translation*. – 2017. – V. 47. – № 10. – P. 682–687. DOI: 10.3103/S0967091217100102.
50. Silicomanganese production at mogale alloys / N.A. Sithole, N. Rambuda, J.D. Steenkamp, D.A. Hayman, C. Hockaday // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2018. – V. 118. – № 11. – P. 1205–1216. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n11a11.
51. Хмельевская Н.Г. Приоритеты внешней торговли политики России в орбите экономического сотрудничества БРИКС // *Экономическая политика*. – 2015. – Т. 10. – № 2. – С. 93–109.

Поступила 14.11.2019 г.

#### Информация об авторах

**Боярко Г.Ю.**, доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Хатьков В.Ю.**, начальник департамента 817 ПАО «Газпром»; соискатель Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 339.13:546.711

## CRITICAL COMMODITY FLOWS OF MANGANESE RAW MATERIALS IN RUSSIA

Grigory Yu. Boyarko<sup>1</sup>,  
gub@tpu.ru

Vitaly Yu. Khatkov<sup>2</sup>,  
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

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

<sup>2</sup> Gazprom,  
2, Pobedy square, St. Petersburg, 196143, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need to study the problem of import dependence of Russia on manganese raw materials.

**The aim** of the research is to study the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of manganese products (ores and concentrates, ferromanganese, silicomanganese and manganese metal); development of recommendations to optimize the turnover of manganese products.

**Methods:** statistical, graphic, logical.

**Results.** Manganese products are one of the most mass import-dependent goods in Russia. More than 1,6 million tons, which is 72 % of their consumption, were imported in 2018. Import dependence on manganese ores as of 2018 is 100 % of consumption (1,3 million tons were imported), silica manganese – 46 % (import is 192 thousand tons), manganese metal – 100 % (import is 68 thousand tons) and ferromanganese – 10 % (import is 21 thousand tons). Consumption of manganese concentrate increased from 285 thousand tons in 1996 to 1,3 million tons in 2018 (+7,2 %/year). In near future, the ferrous metallurgy of Russia will not be able to do without the import of manganese concentrate. Serious regulation of imports of manganese concentrate from Kazakhstan, South Africa and Gabon is required, as well as Russian investments in foreign manganese mining and ferroalloy companies. National consumption of silica manganese increased from 170 thousand tons in 1998 to 455 thousand tons in 2017 (+5,3 %/ year), and production increased from 50 to 355 thousand tons/year (+6,5 %/year). Import volumes of silicomanganese remain at the same level – 170–190 thousand tons/year, although in 2003–2008 import volumes were 310–435 thousand tons/year. The reduced imports from Ukraine were replaced by supplies from Georgia, Kazakhstan and Norway. National consumption of ferromanganese increased slightly – from 193 thousand tons in 1996 to 262 thousand tons in 2017 (+0,6 %/year), and production volumes increased sharply from 50 to 260 thousand tons/year (+6,5 %/year). The volume of imports of ferromanganese at the same time seriously decreased from 130 to 21 thousand tons/year (–3,9 %/year). Ferromanganese came out of full import dependence in import-independent category. The demand for a new commodity product – metallic manganese occurred. Its consumption increased from 0,3 thousand tons in 1996 to 68 thousand tons in 2018 (+12,2 %/year). In the context of total imports of manganese ferro-alloys the phenomenon of counter import-export trade (export to 63 thousand tons/year of ferromanganese and to 133 thousand t/year of silicomanganese), until the formation of the direction of net exports of ferromanganese (to 41 thousand tons/year of ferromanganese) appeared.

**Key words:**

Ferroalloy industry of Russia, manganese ores and concentrates, ferromanganese, silicomanganese, metal manganese, import dependence, counter commodity flows

**REFERENCES**

1. Trubetskoy K.N., Chanturiya V.A., Vorobyov A.E., Tiginov L.P. Manganets. *Mineralno-syrevaya baza SNG. Dobycha i obogashchenie rud* [Manganese. Mineral resource base of the CIS. Extraction and enrichment of ores]. Moscow, Mining Academy Publ., 1999. 271 p.
2. Tiginov L.P. State and prospects of development of raw materials base of ferrous metallurgy. Manganese ore. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 1994, no. 4, pp. 14–19. In Rus.
3. Schulz K.J., DeYoung J.H., Seal R.R., Bradley D.C. *Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply*. Reston, U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey. 2017. 862 p. Available at: [https://pubs.usgs.gov/pp/1802/pp1802\\_entirebook.pdf](https://pubs.usgs.gov/pp/1802/pp1802_entirebook.pdf) (accessed: 6 October 2019).
4. *Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets*. Written by Deloitte Sustainability; British Geological Survey; Bureau de Recherches Géologiques et Minières; Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. 2017. 515 p. Available at: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1> (accessed: 6 October 2019).
5. *Public annual market research report [Manganese]*. International Manganese Institute (IMI). 2016. 92 p. Available at: [https://www.manganese.org/files/publications/PUBLIC%20RESEARCH%20REPORTS/2013\\_IMnI\\_Public\\_Report.pdf](https://www.manganese.org/files/publications/PUBLIC%20RESEARCH%20REPORTS/2013_IMnI_Public_Report.pdf) (accessed: 6 October 2019).
6. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2016–2017 godakh»* [State report «State and use of mineral resources of the Russian Federation in 2016–2017】. Available at: [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (accessed: 6 October 2019).
7. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Rossii* [Federal state statistics service of Russia]. Available at: <https://gks.ru/emiss> (accessed: 6 October 2019).
8. *Federalnaya tamozhennaya sluzhba Rossii* [Federal customs service of Russia]. Available at: <http://stat.customs.ru/analytics/> (accessed: 6 October 2019).
9. *TrendEconomy*. Available at: <http://data.trendeconomy.ru/data-viewer/trade/statistics/> (accessed: 6 October 2019).
10. *Informatsionno-analiticheskiy tsentr «Mineral»* [Information and analytical center «Mineral】. Available at: <http://www.mineral.ru/Center/index.html> (accessed: 06 October 2019).
11. Tangstad M. Manganese ferroalloys technology (Book Chapter). *Handbook of ferroalloys*. Oxford (UK); Waltham (USA), Butterworth-Heinemann, 2013. pp. 221–266. DOI: 10.1016/B978-0-08-097753-9.00007-1.

12. Koloskova I.S. Structure of production and market of manganese raw materials in Russia. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2014, no. 1, pp. 74–77. In Rus.
13. Polulyakh L.A., Dachevskii V.Y., Yusfin Y.S. Manganese-ferroalloy production from Russian manganese ore. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, no. 9, pp. 617–624. DOI: 10.3103/S0967091214090125.
14. Leontev L.I., Zhuchkov V.I., Zhdanov A.V., Dachevskii V.Y. Ferroalloy production in Russia. *Steel in Translation*, 2015, vol. 45, no. 10, pp. 773–777. DOI: 10.3103/S0967091215100101.
15. Lapteva A.M., Mitrofanov N.P., Tigonov L.P. Alloying metal supply: state-of-the art, problems and prospects. *Gorny zhurnal*, 2017, no. 7, pp. 10–16. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.02. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.02 In Rus.
16. Boyarko G.Yu., Hatkov V.Yu. Commercial streams of ferroalloys in Russia. *Chernye metally*, 2018, no. 3, pp. 60–69. In Rus.
17. Dachevskii V.Y., Zhuchkov V.I., Leontev L.I. Utilization of manganese in Russian metallurgy. *Steel in Translation*, 2019, vol. 49, no. 1, pp. 50–57. DOI: 10.3103/S0967091219010042.
18. Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu. World and Russian counter import-export flows of mineral products. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 145–167. In Rus.
19. *Strategiya razvitiya chernoy metallurgii Rossii na 2014–2020 gody i na perspektivu do 2030 goda* [Strategy of development of ferrous metallurgy of Russia for 2014–2020 and for perspective till 2030]. By order of the Ministry of industry and trade Russia. 05.05.2014, no. 839. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (accessed: 6 October 2019).
20. Hodina M.A. Russian market of manganese products and potential possibilities of its import substitution. *Razvedka i ohrana nedr*, 2017, no. 2, pp. 42–48. In Rus.
21. *Margantsevoe rudooobrazovanie na territorii SSSR* [Manganese ore formation in the USSR]. Ed by D.G. Sapozhnikov. Moscow, Nauka Publ., 1984. 280 p.
22. Valshchikov A.V., Litvinenko A.P., Deler M. The project of development of the Usinsk Deposit of manganese. The technology of enrichment of ore. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2011, no. 3, pp. 80–83. In Rus.
23. Dachevskii V.Y., Yusfin Y.S., Podgorodetskii G.S., Baeva N.V. Production of manganese ferroalloys from Usinsk manganese ore. *Steel in Translation*, 2013, vol. 43, no. 9, pp. 544–551. DOI: 10.3103/S0967091213090052.
24. Primak V.S., Nebogov V.K., Spiridonova E.L. Prospects for the development of the Porozhinsky manganese Deposit in the Krasnoyarsk region. *Gorny zhurnal*, 2006, no. 8, pp. 23–27. In Rus.
25. Salikhov D.N., Kovalev S.G., Brusnitsyn A.I. *Poleznye iskopayemye respubliki Bashkortostan (margantsevye rudy)* [Minerals of the Republic of Bashkortostan (manganese ores)]. Ufa, Geology Institute AN of Bashkortostan Republic, 2002. 243 p.
26. Kontar E.S. *Margantsevye mestorozhdeniya Urala* [Manganese deposits of the Urals]. Ekaterinburg, KPR po Sverdlovskoy oblasti Publ., 1999. 118 p.
27. Kostyuk B.F., Ostrovskiy L.A., Penchuk V.N., Ilyushinov A.L. Margantsevonosnost polyarnogo Urala [Manganese content of the Polar Urals]. *Sostoyanie margantsevo-rudnoy bazy Rossii i voprosy obespecheniya promyshlennosti margantsem* [State of manganese-ore base of Russia and issues of supporting industry with manganese]. Ekaterinburg, The Ekaterinburg Association of small business Publ., 2000. pp. 93–98.
28. Tsykin R.A. Hypergenic manganese ores of Central Siberia. *Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering and technology*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 3–16. In Rus.
29. Vahrushev V.A., Pavlenko Yu.V. Chitinskaya oblast – novaya potencialnaya margantsevorudnaya provintsia Rossii [Chita region – a new potential manganese province of Russia]. *Sostoyanie margantsevo-rudnoy bazy Rossii i voprosy obespecheniya promyshlennosti margantsem* [State of manganese-ore base of Russia and issues of supporting industry with manganese]. Ekaterinburg, The Ekaterinburg Association of small business Publ., 2000. pp. 116–123.
30. Cherepanov A.A. Margantsevye rudy Dalnego Vostoka [Manganese ores of the Far East]. *Sostoyanie margantsevo-rudnoy bazy Rossii i voprosy obespecheniya promyshlennosti margantsem* [State of manganese-ore base of Russia and issues of supporting industry with manganese]. Ekaterinburg, The Ekaterinburg Association of small business Publ., 2000. pp. 134–136.
31. Byhovskiy L.Z., Tigonov L.P., Mirchink I.M., Terentev V.B. Ferromanganese formations of the world ocean and sea shelf – mineral raw materials of multipurpose purpose. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2009, no. 2, pp. 17–24. In Rus.
32. Zubkov M.V., Plucinski P.K., Dartiguelongue A.C.Y., Lusty P.A.J. Metal extraction from deep-ocean mineral deposits. *Elements*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 319–324. DOI: 10.2138/gselements.14.5.319
33. Lusty P.A.J., Murton B.J. Deep-ocean mineral deposits: Metal resources and windows into earth processes. *Elements*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 301–306. DOI: 10.2138/gselements.14.5.301
34. *UN Convention on the law of the sea*. Done at Montego Bay on 10 December 1982 (Rev. from 23.07.1994). 193 p. Available at: [https://www.un.org/depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/unclos\\_e.pdf](https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf) (accessed: 6 October 2019).
35. Rogozhin A.A., Temnov A.V., Tigonov L.P., Petrova N.V., Konoplev A.D. Modern technologies in effective development and development of mineral resources base of solid minerals of Russia. *Razvedka i ohrana nedr*, 2006, no. 7, pp. 33–41. In Rus.
36. Tigonov L.P., Ozhogina E.G., Litvintsev E.G., Bronickaya E.S., Anufrieva S.I., Kalish E.A. Modern technologies of enrichment and hydrometallurgical processing of manganese ores. *Gorny zhurnal*, 2007, no. 2, pp. 78–84. In Rus.
37. Chernobrovin V.P., Mizin V.G., Sirina T.P. Production of high-quality manganese concentrates from carbonate ores. *Stal*, 2005, no. 1, pp. 53–55.
38. Chernobrovin V.P., Mizin V.G., Sirina T.P., Dachevskiy V.Ya. *Kompleksnaya pererabotka karbonatnogo margantsevogo syr'ya: khimiya i tekhnologiya* [Complex processing of carbonate manganese raw materials: chemistry and technology]. Chelyabinsk, Centr YuUrGU Publ., 2009. 293 p.
39. Sokolova V.N., Anufrieva S.I., Temnov A.V., Borzykh O.S., Yakushina O.A. Prospects of application of heap leaching technology for processing of hard-to-enrich manganese ores. *Razvedka i ohrana nedr*, 2011, no. 8, pp. 44–49. In Rus.
40. Das A.P., Ghosh S. Bioleaching of manganese from mining waste materials. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 2381–2390. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.459.
41. Zhukov D.Y., Averina Y.M. Development of a pyrometallurgical technology for processing synthetic pyrolusite and chemisorption manganese oxide concentrate into metallic manganese and low-carbon ferroalloys. *CIS Iron and Steel Review*, 2019, vol. 17, pp. 25–29. DOI: 10.17580/cisir.2019.01.04.
42. Streltsov V.I., Volkov Yu.I., Balashov A.G., Streltsova T.P. Complex development of subsoil by the method of borehole hydraulic mining. *Gorny zhurnal*, 2010, no. 7, pp. 33–36. In Rus.
43. Dachevskiy V.Ya., Yusfin Yu.S., Aleksandrov A.A., Leontev L.I., Podgorodeckij G.S., Gubanov V.I. Improving manganese utilization in the production of manganese ferroalloys. *Steel in Translation*, 2013, no. 7, pp. 32–37. DOI: 10.3103/S0967091213070036.
44. Chirakadze A., Gurchemelia L., Khomeriki I., Toscano W.A., Bazghadze I., Geleishvili I., Gvakharia V., Geleishvili T. Complex processing of manganese bearing waste and low-grade ores by autoclaving method. *International journal of global warming*, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 291–306. DOI: 10.1504/IJGW.2016.077919.
45. Zhuchkov V.I., Zhdanov A.V., Leontev L.I., Dachevskii V.Y. Calculations of manganese ferroalloys production efficiency from different ores. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 11, pp. 814–817. DOI: 10.3103/S0967091216110139.
46. Zhukov D.Y., Averina Y.M., Menshikov V.V. Design of a hydro-metallurgical complex for processing of complex low-grade manganese ores. *CIS Iron and Steel Review*, 2018, vol. 16, pp. 4–10. DOI: 10.17580/cisir.2018.02.01.
47. Cheraghi A., Yoozbashizadeh H., Ringdalen E., Safarian J. Kinetics and mechanism of low-grade manganese ore reduction by natural gas. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2019, vol. 50, no. 4, pp. 1566–1580. DOI: 10.1007/s11663-019-01574-4.
48. Han P., Zhang G., Chu S. Reducing dephosphorization of silicomanganese ferroalloys by CaO-based slag. *Metallurgical Research and Technology*, 2017, vol. 114, no. 6, Article number 605. DOI: 10.1051/metal/2017020.

49. Tleugabulov S.M., Tazhiev E.B. Energy-saving ferroalloy production. *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, no. 10, pp. 682–687. DOI: 10.3103/S0967091217100102.
50. Sithole N.A., Rambuda N., Steenkamp J.D., Hayman D.A., Hockaday C. Silicomanganese production at mogale alloys. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, vol. 118, no. 11, pp. 1205–1216. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n11a11.
51. Khmelevskaya N.G. Priorities of Russia's foreign trade policy in the orbit of BRICS economic cooperation. *Ekonomicheskaya politika*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 93–109. In Rus.

*Received: 14 November 2019.*

**Information about the authors**

**Grigory Yu. Boyarko**, Dr. Sc., Cand. Sc., professor National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vitaly Yu. Khatkov**, head of the department 817, Gazprom.

УДК 556.314.6(282.256.1)

## МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВЕРХНЕЙ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗОНЫ В БАССЕЙНЕ ВЕРХНЕЙ ОБИ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ИХ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Пасечник Елена Юрьевна<sup>1</sup>,  
paseyu@yandex.ru

Гусева Наталья Владимировна<sup>1</sup>,  
guseva24@yandex.ru

Савичев Олег Геннадьевич<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Льготин Виктор Александрович<sup>2</sup>,  
mail@sfo.geomonitoring.ru

Балобаненко Андрей Александрович<sup>2</sup>,  
baa@sfo.geomonitoring.ru

Домаренко Виктор Алексеевич<sup>1</sup>,  
domarenkova@tpu.ru

Владимирова Ольга Николаевна<sup>1</sup>,  
olechka-555-94@mail.ru

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

<sup>2</sup> Гидроспецгеология,  
Россия, г. Томск, 634061, ул. Никитина, 99.

**Актуальность** исследования определяется необходимостью учета наиболее полной информации о химическом составе подземных вод при их подготовке для хозяйственно-питьевого использования. Ранее для бассейна Верхней Оби были получены данные преимущественно по макрокомпонентному составу, перманганатной окисляемости, биогенным элементам и содержаниям ограниченного количества микроэлементов, что не позволяло объективно оценить возможное влияние региональных факторов с токсикологическим и санитарно-токсикологическим лимитирующими признаками воздействия.

**Цель** исследования заключается в оценке микроэлементного состава подземных вод эксплуатируемых горизонтов верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней Оби (на территории Алтае-Саянской гидрогеологической складчатой области и примыкающих к ней районов Западно-Сибирского артезианского бассейна).

**Объекты:** подземные воды, используемые для питьевого водоснабжения в бассейне Верхней Оби (территории Республики Алтай, Алтайского края, Новосибирской, Кемеровской и Томской областей).

**Методы:** современные методы определения химического состава подземных вод, включая: в 2019 г. – масс-спектрометрический метод с индуктивно связанной плазмой (ICP MS); в 1998 г. – нейтронно-активационный анализ; статистические методы.

**Результаты.** Выполнен анализ химического состава подземных вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения в бассейне Верхней Оби. Полученные результаты позволяют существенно расширить представление о микроэлементном составе подземных вод рассматриваемой территории. Показано, что уровень содержания большинства изученных микроэлементов меньше установленных в Российской Федерации нормативов качества. Однако показатель аддитивного воздействия (сумма отношений фактических и предельно-допустимых концентраций веществ 1–2 классов опасности  $\Sigma C_{1-2}/ПДК$ ) часто больше единицы, что указывает на потенциальное токсичное воздействие на здоровье при использовании подземных вод без соответствующей водоподготовки. Наиболее высокие значения  $\Sigma C_{1-2}/ПДК$  (более 5) отмечены для подземных вод в Алтайском крае и Республике Алтай, в селах Хабазино, Онгудай и Тальменка (водосборы притоков Оби – рек Алей, Катунь и Чумыш, соответственно). С учетом установленных рудопоявлений и характера концентрирования в подземных водах региона парагенетических ассоциаций химических элементов сделано предположение о существенном вкладе природных факторов в формирование наблюдаемого уровня содержания многих микроэлементов.

### Ключевые слова:

Микроэлементный состав, подземные воды, Верхняя Обь, Алтае-Саянская гидрогеологическая складчатая область, Западно-Сибирский артезианский бассейн.

### Введение

Гидрогеохимические исследования в бассейне Верхней Оби в связи с поисками полезных ископаемых и обеспечением водоснабжения проводятся уже более 140 лет [1–7]. За это время накоплен огромный объем информации о суммарном содержании растворенных солей, макрокомпонентном составе, перманганатной окисляемости, содержаниях соединений азота, кремния, фосфора, железа. Однако данные по микроэлементному составу подземных вод представлены в основном материалами, полученными с использованием эмиссионного спектрального метода (часто – полуколичественного) по относительно широкому перечню компонентов либо по содержанию Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, As (несколько реже – Al, Li и некоторых других элементов) с помощью атомно-абсорбционного, инверсионно-вольт-амперометрического и полярографического методов. В отдельных случаях выполнялся нейтронно-активационный анализ по ограниченному числу проб [2, 3, 5–10].

С учетом указанного выше дефицита гидрогеохимической информации и требований по обеспечению га-

рантированного хозяйственно-питьевого водоснабжения населения в условиях обострения водно-экологических проблем во всем мире [5, 11–18] выполнено исследование микроэлементного состава подземных вод эксплуатируемых горизонтов верхней гидрогеодинамической зоны в части бассейна р. Обь, соответствующей Алтае-Саянской гидрогеологической складчатой области (АСГО) и примыкающих к ней пограничных районов Западно-Сибирского артезианского бассейна (ЗСАБ). Основная часть подземных и поверхностных вод формируется в условиях горных районов (относительное изменение высотных отметок поверхности более 200 м и/или абсолютные отметки более 500 м – Горный Алтай, Кузнецкое Алатау, Горная Шория, Салаир [5, 9, 10]), что позволяет (с некоторой условностью) отнести исследуемую территорию к верхней части бассейна Оби (далее – Верхняя Обь).

#### Исходная информация и методика исследования

Основная концепция исследования заключалась в оценке современного (по состоянию на 2019 г.) микроэлементного состава подземных вод верхней гидрогеодинамической зоны эксплуатируемых водоносных горизонтов и сравнении полученных данных с материалами исследований, выполненных в 1998 г. [19].

Объектом исследования являются подземные воды в: А) 2019 г. (рисунок, табл. 1) в пределах: А.1) АСГО: 3 – эксплуатационная скважина в пгт. Маслянино, Новосибирская область; 5 – наблюдательная скважина в с. Кузедеево, Кемеровская область; 7 – эксплуатационная скважина в п. Чемал, Республика Алтай; 8 – родник на окраине с. Онгудай, Республика Алтай; 9 – эксплуатационная скважина в с. Онгудай, Республика Алтай; 10 – родник в с. Курай, Республика Алтай; 11 – эксплуатационная скважина в с. Курай, Республика Алтай; 12 – эксплуатационная скважина в с. Турочак, Республика Алтай; 13 – родник на окраине с. Шебалино, Республика Алтай; А.2) примыкающих районов ЗСАБ: 1 – наблюдательная скважина в с. Боровиха, Алтайский край; 2 – наблюдательная скважина в с. Хабазино, Алтайский край; 4 – наблюдательная скважина в пгт. Болотное, Новосибирская область; 6 – эксплуатационная скважина в г. Мариинск, Кемеровская область; 21 – эксплуатационная скважина № 66 Томского подземного водозабора в Обь-Томском междуречье, Томская область; В) в 1998 г. (рисунок, табл. 2) в пределах АСГО: В.1) 11 – эксплуатационная скважина в с. Курай, Республика Алтай; 12 – эксплуатационная скважина в с. Турочак, Республика Алтай; 14 – родник у п. Чибит, Республика Алтай; 15 – эксплуатационная скважина в с. Онгудай, Республика Алтай; 16 – эксплуатационная скважина в с. Муны, Республика Алтай; В.2) в пределах примыкающих районов ЗСАБ: 17 – эксплуатационная скважина у с. Баюновские Ключи; 19 – эксплуатационная скважина в с. Эстонка, Новосибирская область; 20 – родник на окраине г. Томска (район Академгородка), Томская область; 21 – эксплуатационная скважина № 56 Томского подземного водозабора в Обь-Томском междуречье, Томская область.

Общее количество проб подземных вод – 23, в том числе в 2019 г. из наблюдательных скважин – 4, из эксплуатационных скважин – 6, из родников – 3, в 1998 г. из эксплуатационных скважин – 8, из родников – 2. Пробы воды отбирались из скважин после прокачки, из родников – после прокачки эмалированной емкостью и отстаивания [20–23]. В пробах подземных вод проводилось определение значений pH (потенциометрический метод), перманганатной окисляемости (ПО), содержания  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$  (титриметрический),  $\text{SO}_4^{2-}$  (турбидиметрический),  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , фосфаты, Fe (фотометрический, ионная хроматография, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра NexION 300D),  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  (ионная хроматография), ряд микроэлементов (в 2019 г. – масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой, в 1998 г. – нейтронно-активационный). Лабораторные работы выполнены в ТПУ.

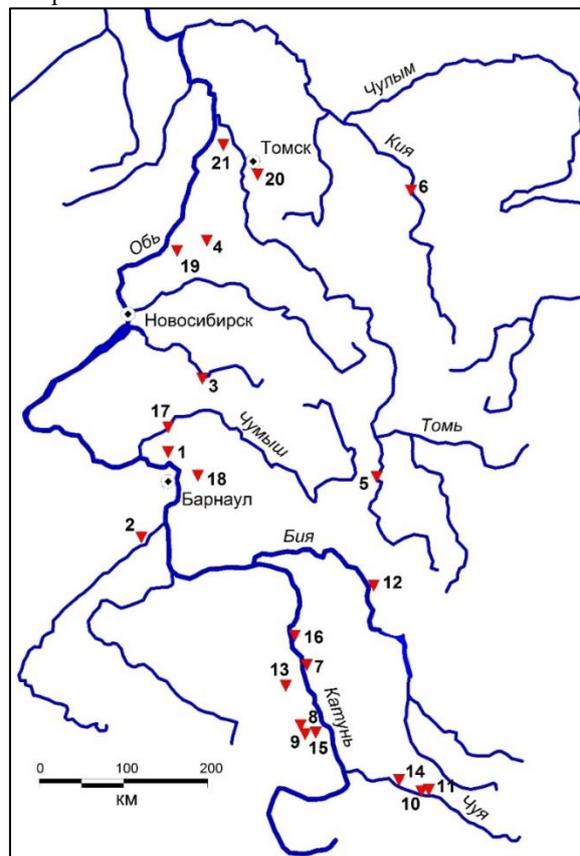


Рисунок. Схема размещения пунктов гидрогеологических наблюдений (номера пунктов приведены в табл. 1, 2)

Figure. Layout of hydrogeological observation points (point numbers are given in tables 1, 2)

Обработка полученных данных включала в себя расчет критериев аддитивного воздействия растворенных веществ (сумма отношений фактической и предельно допустимых концентраций веществ первого и второго классов опасности), оценку статистических параметров, корреляционный и регрессионный анализ при уровне значимости 5 % при использовании уравнений:

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$
$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-2}},$$

где  $A$  и  $\sigma$  – среднее арифметическое и среднее квадратическое значения;  $r$  – коэффициент корреляции;  $N$  – объем выборки;  $\delta_A$  и  $\delta_r$  – погрешности определения среднего арифметического и коэффициента корреляции; связь между величинами  $x$  и  $y$  при уровне значимости 5 % принимается значимой, если выполняется условие  $|r| > 2 \cdot \delta_r$ . Результаты статистического анализа сопоставлялись с материалами геологических исследований [1, 2, 7, 10, 24, 25].

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассматриваемая территория бассейна р. Оби соответствует гидрогеологическому региону Западно-Сибирской плиты, в пределах которого, как указывалось выше, расположены гидрогеологические структуры I порядка – ЗСАБ и АСГСО. В геологическом разрезе ЗСАБ выделяется складчатый фундамент, сложенный породами палеозоя, и чехол, образованный осадочными отложениями мезозойского и кайнозойского возрастов. В разрезе последних, в свою очередь, прослеживается два гидрогеологических этажа с резко различными условиями формирования подземных вод, разделенные региональным водоупором верхнемелового-палеогенового возраста. Верхний гидрогеологический этаж на большей части ЗСАБ представляет собой многослойную толщу, включающую более 30 водоносных горизонтов в палеогеновых, неогеновых и четвертичных отложениях. Подземные воды верхнего этажа – в основном пресные, инфильтрационного генезиса, достаточно активно используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения. В северной оконечности Кузнецкого Алатау источником водоснабжения в ряде случаев являются водоносные мезозойские отложения [1, 4, 7]. Гидрогеологические условия АСГСО характеризуются также наличием двух гидрогеологических этажей (верхний приурочен к рыхлым мезо-кайнозойским отложениям, нижний – к палеозойским и протерозойским породам различного генезиса) и широким распространением трещинно-жилльных вод. Поровые воды развиты в основном в четвертичных отложениях речных долин и прилегающих территорий. Для хозяйственно-питьевого водоснабжения достаточно часто используются подземные воды нижнего этажа, несколько реже – верхнего [2, 7, 9, 10, 26].

Общая закономерность в изменении минерализации и химического состава подземных вод проявляется в увеличении суммарного содержания растворенных солей при уменьшении интенсивности водообмена (соответственно – увеличении времени взаимодействия в системе «вода–порода»), что чаще всего наблюдается в отложениях неогена (табл. 3). В пространственном и ландшафтном отношении, как это отмечено в [3, 5, 10], наибольшие значения минерализации в основном приурочены к горнотеплым участкам межгорных котловин и лесостепным участкам предгорных районов. Примерно такая же ситуация

наблюдалась в 1998 и 2019 гг., когда наибольшие значения суммы главных ионов  $\Sigma_{\text{ги}}$  ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) были зафиксированы на лесостепных участках на границе АСГСО и ЗСАБ и в долине р. Катунь на участке ее среднего течения (табл. 1, 2). Превышения нормативов качества хозяйственно-питьевого водоснабжения выявлены по содержанию: минерализация – Онгудай (пункт 9, рисунок), Тальменка (17);  $\text{Mg}^{2+}$  – Онгудай (9);  $\text{NO}_3^-$  – Чемал (7), Онгудай (9), Тальменка (17); Fe – Боровиха (1), Хабазино (2), Маслянино (3), Болотное (4), Кузедеево (5), Мариинск (6), Онгудай (9), Баюновские Ключи (180, Эстонка (19), Томский водозабор, скважина № 56 (21); Mn – Боровиха (1), Хабазино (2), Кузедеево (3); Vg – Хабазино (2), Онгудай (9); Ba – Тальменка (17); Li – Тальменка (17); Pb – Хабазино (2).

Кроме того, сумма соотношений фактических и предельно допустимых концентраций веществ первого и второго класса опасности ( $\Sigma C_{1,2}/\text{ПДК}$ ) была больше единицы в подземных водных объектах в пунктах: Боровиха (1), Хабазино (2), Маслянино (3), Кузедеево (5), Мариинск (6), Чемал (7), Онгудай (8, 9, 15), Курай (11; в 1998 г.), Шебалино (13), Чибит (14), Турочак (12; в 1998 г.), Тальменка (17), Баюновские Ключи (18), Эстонка (19), в Обь-Томском междуречье (21).

Предположительно антропогенное влияние на химический состав подземных вод, связанное с поступлением нитратов с удобрениями, отмечено в 1998 г. в Тальменке и в 2019 г. в Чемале и Онгуде. Воздействие антропогенных факторов на уровень содержания прочих изученных веществ менее очевидно. Судя по распространенности месторождений полезных ископаемых и рудопроявлений [7, 9, 10, 24, 25] и приуроченности к ним соответствующих повышенных концентраций, более вероятно природное происхождение последних. Например, практически повсеместно высокое содержание железа в подземных водах рассматриваемой территории в целом совпадает с месторождениями черных металлов (Fe – Таштагольское, Тейское, Казское, Анзасское, прилегающие территории к Бакчарскому рудопроявлению; Ti – Туганское; Mn – Усинское) и, согласно [5, 25, 26], связано как с относительным концентрированием за счет выноса других элементов, так и с поступлением соединений железа из водовмещающих пород. С выносом из водовмещающих пород (Салаирская и Урская группы месторождений Cu, Zn, Pb, Au, барита [24]), видимо, можно связать и выявленные в ряде случаев высокие концентрации Pb и Ba.

Также следует отметить, что в эксплуатационных скважинах Томского водозабора, сел Турочак и Курай и в 1998 г., и в 2019 г. наблюдались сопоставимые (с учетом погрешностей определения) концентрации Fe и примерно одинаковые тенденции их изменения ( $\text{мг/дм}^3$ : 2,70/2,47; 0,100/0,056; 0,080/0,059, соответственно). С учетом удаленности скважин, приуроченности их к разным отложениям и отбором проб в 1998 и 2019 гг. в разные фазы водного режима можно предположить, что этот факт, особенно однотипное изменение за многолетний период в трех скважинах,

объясняется влиянием условий водной миграции на уровень содержания Fe. В частности, в 2019 г. пробы, хотя и отобраны в весенний период, но (вследствие инерционности гидрогеохимических процессов) характеризуют переход от зимней межени к весеннему половодью. В 1998 г. пробы отобраны в конце летнего периода, когда инфильтрация ультрапресных атмосферных осадков и вынос из почвенного покрова органических веществ и их соединений с металлами уже сказывается на химическом составе подземных вод. В результате минерализация вод (как правило, обратно пропорциональная интенсивности водоомена) из скважин в селах Курай и Турочак в 1998 г. была несколько ниже, чем в 2019 г., а величина ПО, концентрации Fe, Co, Pb и ряда других элементов – выше.

Ряд микроэлементов (и в 1998 г., и в 2019 гг.) находится в подземных водах в количестве меньше допустимого, но, тем не менее, повышенные содержания этих элементов локализуются по территории достаточно неравномерно. Например, несколько повышенные концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) выявлены на участках аккумуляции продуктов денудации на границе ЗСАБ и АСГСО в районе Барнаула и Томска (табл. 1, 2). В то же время концентрации Au, Ag и Hg, несмотря на многочисленные рудопроявления, весьма незначительны, что объясняется их незначительной миграционной способностью [5, 27–30].

В целом же, с учетом результатов корреляционного анализа данных за 2019 г., прослеживается определенная тенденция концентрирования в подземных водах региона парагенетических ассоциаций химических элементов, сопряженных с рудопроявлениями [9, 10, 24]: а) титаномagnetитовыми магматическими – коэффициенты корреляции:  $r(\text{Fe}, \text{Ti})=0,92\pm 0,05$ ; б) алюминиевыми и железистых латеритов коры выветривания:  $r(\text{Fe}, \text{Al})=0,94\pm 0,04$ ;  $r(\text{Fe}, \text{Co})=0,76\pm 0,13$ ;  $r(\text{Fe}, \text{Ni})=0,90\pm 0,06$ ; в) свинцово-цинковыми и золото-сульфидными постмагматическими (связанными с кислыми интрузиями):  $r(\text{Zn}, \text{Pb})=0,97\pm 0,02$ ;  $r(\text{Pb}, \text{Bi})=0,92\pm 0,05$ ;  $r(\text{Zn}, \text{Bi})=0,87\pm 0,07$ ;  $r(\text{Au}, \text{As})=0,48\pm 0,23$ ;  $r(\text{Fe}, \text{Bi})=0,60\pm 0,19$ ;  $r(\text{Fe}, \text{Cu})=0,55\pm 0,21$ .

Кроме того, отмечены (также по данным за 2019 г.) статистически значимые коэффициенты корреляции между концентрациями РЗЭ, с одной стороны, и с другой стороны – Th, Fe (более 0,80–0,90) [31] и Р (более 0,70), что указывает на формирование россыпей на участках палеозойского обрамления ЗСАБ (например, Туганское циркон-ильменитовое месторождение с включениями монацита [25]). В случае Fe эти связи могут быть использованы и в процессе водоподготовки, поскольку сорбция многих микроэлементов на частицах гидроксидов  $\text{Fe}^{3+}$  (в процессе обезжелезивания) потенциально позволяет достичь снижения величины  $\Sigma\text{C}_{1-2}/\text{ПДК}$  до требуемых значений (до единицы).

**Таблица 1.** Химический состав подземных вод в бассейне Верхней Оби по результатам отбора проб в 2019 г.

**Table 1.** Chemical composition of groundwater in the Upper Ob basin according to the results of sampling in 2019

Показатель Indicator	Номер пункта пробоотбора на рисунке/Sampling point number in figure													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	21
Пункт/Point	Боровиха Borovikha	Хабазино Khabazino	Маслянино Maslyanino	Болотное Bolotnoe	Кузделеево Kuzdeeevo	Маринск Martinsk	Чемал Chemal	Онгудай Onguday		Курай Kuray		Турочак Turochak	Шебалино Shebalino	Томский водозабор Tomsk water intake
Место отбора пробы Place of sampling	скв.(н) well (ob)	скв.(н) well (ob)	скв.(э) well (op)	скв.(н) well (ob)	скв.(н) well (ob)	скв.(э) well (op)	скв.(э) well (op)	Родник Spring	скв.(э) well (op)	Родник Spring	скв.(э) well (op)	скв.(э) well (op)	Родник Spring	скв. 66 (э) well 66 (op)
Возраст отложений Age of deposits	aQ <sub>III</sub>	aQ <sub>E</sub>	D <sub>3</sub> -C <sub>1</sub>	saQ <sub>I-II</sub>	D <sub>3f</sub>	K <sub>1-2</sub>	Є <sub>2</sub> -O <sub>1</sub>	D <sub>1-2</sub> , Q-O <sub>1-2</sub>	D <sub>1-2</sub>	Q <sub>III</sub>	R <sub>3</sub> -V+Q	Q <sub>III</sub>	Є <sub>1</sub>	Р
Структура Structure	II	II	I	II	I	II	I	I	I	I	I	I	I	II
Дата отбора Date of sampling	23.04	23.04	23.04	23.04	06.05	09.05	24.05	27.05	27.05	30.05	31.05	22.05	01.06	02.03
Широта, ° Latitude	53,50	52,73	54,33	55,67	53,34	56,20	51,43	50,76	50,74	50,24	50,21	52,26	51,30	–
Долгота, ° Longitude	83,84	83,38	84,21	84,41	87,23	87,76	85,99	86,12	86,14	87,93	87,94	87,13	85,69	–
pH, ед. pH Unit pH	8,36	8,11	7,66	8,11	7,93	7,30	7,77	7,71	7,67	8,08	8,28	7,78	7,78	7,57
ПО, мг О/дм <sup>3</sup> PO, mg O/dm <sup>3</sup>	1,50	3,70	0,45	2,20	1,10	0,18	3,00	0,66	2,60	0,40	0,28	0,50	0,36	1,26
	мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>													
$\Sigma_{\text{гг}}$	500,1	656,8	482,1	177,6	271,4	249,7	464,3	324,8	1339,7	232,0	266,5	177,9	367,1	521,08
P	0,088	0,041	0,018	0,002	0,018	0,080	0,013	0,010	0,019	0,013	0,013	0,010	0,010	0,72
Si	2,09	0,87	5,92	0,30	1,67	7,18	4,82	5,42	5,68	3,73	4,11	3,79	6,19	10,39
Fe	5,796	2,317	0,790	0,643	2,039	1,480	0,115	0,066	0,315	0,040	0,059	0,056	0,088	2,47
	мкг/дм <sup>3</sup> /mkг/dm <sup>3</sup>													
Li	3,60	10,38	4,63	4,54	9,31	1,30	3,20	2,70	12,80	4,70	1,70	0,80	18,00	1,2
Be	0,009	0,008	0,002	0,006	0,005	0,002	0,005	0,014	0,007	0,005	0,005	0,007	0,005	0,035
B	63,5	136,3	63,7	40,7	32,3	16,0	159,0	27,0	287,0	19,0	24,0	11,0	30,0	75,0
Al	176,4	69,4	7,9	4,3	6,2	10,0	6,3	0,6	0,1	1,1	6,0	1,7	0,8	1,5

Показатель Indicator	Номер пункта пробоотбора на рисунке/Sampling point number in figure													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	21
Sc	8,19	0,18	0,76	0,11	0,33	0,88	0,78	0,73	0,76	0,45	0,50	0,48	0,77	0,66
Ti	8,19	3,17	0,84	0,14	0,43	0,70	0,50	0,49	0,82	0,35	1,14	0,46	0,54	0,68
V	0,57	0,45	0,13	0,04	0,02	0,04	0,60	0,52	1,23	0,29	0,58	0,59	0,38	0,032
Cr	3,05	8,17	2,91	0,97	2,00	2,10	2,87	1,29	3,17	2,60	3,62	1,02	1,68	1,6
Mn	323,0	405,7	27,5	80,6	272,7	40,0	0,6	0,4	2,7	0,1	1,2	0,1	0,1	280,0
Co	1,06	1,40	0,19	0,28	0,97	0,00	0,11	0,08	0,23	0,04	0,06	0,06	0,06	0,032
Ni	8,30	6,34	1,16	1,08	1,97	0,04	0,35	0,04	0,31	0,10	1,21	0,66	0,02	<0,05
Cu	6,01	10,89	0,47	1,69	5,83	0,03	1,80	0,58	3,09	0,04	0,24	5,83	0,02	<0,05
Zn	10,80	160,06	3,21	3,45	2,09	0,51	51,90	0,68	0,94	0,05	0,68	3,51	0,01	0,51
Ga	0,104	0,057	0,004	0,004	0,008	0,030	0,001	0,005	0,007	0,003	0,002	0,002	0,003	0,0084
Ge	0,087	0,158	0,005	0,008	0,009	0,018	0,013	0,001	0,001	0,005	0,001	0,001	0,005	<0,001
As	0,72	0,50	0,47	0,08	0,23	0,06	1,40	0,50	0,95	0,64	0,62	0,50	0,32	0,054
Se	0,17	1,85	2,36	0,47	0,14	0,21	0,53	0,34	7,39	0,17	0,45	0,50	0,17	1,1
Br	25,7	525,7	15,8	57,5	17,4	19,0	50,0	24,5	369,7	9,1	10,7	6,5	17,3	34,0
Rb	1,09	5,32	0,51	0,42	1,13	4,70	1,10	0,30	1,20	0,60	0,40	0,50	0,40	2,1
Sr	227,6	498,3	454,5	75,5	289,2	150,0	630,0	173,0	1147,0	187,0	200,0	75,0	206,0	510,0
Y	0,3783	0,1834	0,0588	0,0083	0,0178	0,0110	0,0270	0,0480	0,0680	0,0080	0,0056	0,0106	0,0479	0,03
Zr	0,1579	0,1476	0,0392	0,0141	0,0156	0,0060	0,0140	0,0060	0,0090	0,0025	0,0010	0,0047	0,0099	0,022
Nb	0,0203	0,0059	0,0025	0,0003	0,0025	0,0025	0,0130	0,0080	0,0040	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	<0,005
Mo	0,496	0,219	0,798	0,794	1,435	0,207	1,000	1,934	1,294	0,816	0,870	0,100	2,720	0,025
Ru	0,0025	0,0025	0,0012	0,0009	0,0006	0,0025	0,0030	0,0026	0,0003	0,0010	0,0007	0,0025	0,0025	<0,005
Rh	0,0032	0,0135	0,0105	0,0017	0,0069	0,0033	0,0160	0,0032	0,0229	0,0038	0,0050	0,0030	0,0030	0,0047
Pd	0,0028	0,0065	0,0030	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0058	0,0035	0,0033	0,0012	0,0006	<0,005
Ag	0,0056	0,0006	0,4279	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	<0,005
Cd	0,0189	0,1841	0,0111	0,0081	0,2237	0,0019	0,0197	0,0080	0,0010	0,0005	0,0040	0,0110	0,0005	<1,0
In	0,0018	0,0010	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	<0,001
Sn	0,0535	0,8603	0,0781	0,0376	0,0175	0,0019	0,0266	0,0277	0,0025	0,0023	0,0057	0,0036	0,0010	0,0065
Sb	0,0434	0,3251	0,0385	0,0301	0,0131	0,0005	0,0800	0,0520	0,0500	0,0810	0,0880	0,0120	0,5210	0,0029
Te	0,0033	0,0117	0,0037	0,0172	0,0070	0,0000	0,0025	0,0012	0,0248	0,0067	0,0025	0,0025	0,0025	0,016
I	4,4	22,9	20,1	2,9	22,6	50,0	7,2	6,8	62,7	2,3	2,0	1,2	6,5	0,74
Cs	0,0330	0,0166	0,0443	0,0010	0,1379	0,0060	0,0800	0,2940	0,8050	0,0460	0,0010	0,0010	0,0240	0,011
Ba	27,4	31,3	23,1	6,7	70,7	63,0	47,0	4,9	4,2	21,3	12,6	24,1	25,9	18,0
Lu	0,0056	0,0018	0,0001	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0007	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	<0,0005
Hf	0,0137	0,0098	0,0056	0,0049	0,0018	0,0021	0,0040	0,0008	0,0012	0,0021	0,0030	0,0009	0,0043	<0,0005
Ta	0,0129	0,0059	0,0136	0,0117	0,0153	0,0050	0,0080	0,0040	0,0052	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	<0,01
W	0,0756	0,2178	0,0103	0,0233	0,0229	0,0050	0,0100	0,0043	0,0076	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	<0,01
Re	0,0021	0,0032	0,0059	0,0032	0,0039	0,0005	0,0230	0,0023	0,0191	0,0007	0,0016	0,0005	0,0005	<0,001
Os	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0020	0,0015	0,0012	0,0004	0,0005	0,0005	0,0020	<0,0005
Ir	0,0001	0,0008	0,0002	0,0001	0,0002	0,0025	0,0001	0,0001	0,0025	0,0012	0,0012	0,0003	0,0007	<0,005
Pt	0,0025	0,0007	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0007	<0,005
Au	0,0025	0,0044	0,0002	0,0011	0,0025	0,0028	0,0038	0,0025	0,0105	0,0020	0,0025	0,0033	0,0011	<0,005
Hg	0,0132	0,0140	0,0250	0,0250	0,0397	0,0280	0,0345	0,0126	0,0090	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,008
Tl	0,0018	0,0091	0,0033	0,0043	0,0014	0,0018	0,0070	0,0040	0,0050	0,0040	0,0010	0,0020	0,0005	<0,001
Pb	1,37	16,45	0,13	0,16	0,27	0,01	1,49	0,01	0,02	0,01	0,15	1,92	0,01	<0,02
Bi	0,0035	0,0060	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015	0,0010	0,0010	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	<0,003
La	0,4883	0,2162	0,0272	0,0087	0,0145	0,0122	0,0043	0,0062	0,0059	0,0003	0,0024	0,0003	0,0029	0,0029
Ce	0,8585	0,4647	0,0479	0,0088	0,0290	0,0293	0,0031	0,0041	0,0003	0,0003	0,0073	0,0003	0,0003	0,0017
Pr	0,1272	0,0507	0,0072	0,0020	0,0030	0,0036	0,0017	0,0004	0,0013	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	<0,0005
Nd	0,5210	0,2083	0,0293	0,0095	0,0164	0,0084	0,0076	0,0072	0,0059	0,0003	0,0040	0,0011	0,0051	<0,0005
Sm	0,1078	0,0413	0,0127	0,0040	0,0039	0,0010	0,0009	0,0028	0,0017	0,0003	0,0003	0,0003	0,0001	<0,0005
Eu	0,0316	0,0158	0,0064	0,0017	0,0140	0,0122	0,0100	0,0014	0,0019	0,0013	0,0003	0,0003	0,0046	0,016
Gd	0,1118	0,0158	0,0059	0,0008	0,0026	0,0016	0,0027	0,0015	0,0033	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0011
Tb	0,0169	0,0049	0,0007	0,0003	0,0001	0,0002	0,0005	0,0002	0,0008	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	<0,0005
Dy	0,0814	0,0316	0,0037	0,0012	0,0023	0,0005	0,0026	0,0020	0,0059	0,0003	0,0003	0,0010	0,0030	0,0013
Ho	0,0155	0,0064	0,0014	0,0003	0,0006	0,0003	0,0010	0,0007	0,0017	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	<0,0005
Er	0,0385	0,0138	0,0035	0,0003	0,0008	0,0004	0,0010	0,0003	0,0032	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0019
Tm	0,0051	0,0022	0,0006	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0010	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	<0,0005
Yb	0,0252	0,0125	0,0012	0,0003	0,0009	0,0003	0,0010	0,0024	0,0021	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0021
Th	0,0795	0,0063	0,0025	0,0003	0,0037	0,0021	0,0100	0,0080	0,0088	0,0025	0,0025	0,0025	0,0020	<0,005
U	0,0853	0,0186	2,8755	0,0056	0,0585	0,0004	5,549	2,018	20,159	0,3150	0,3150	0,0610	1,5240	<0,001
$\Sigma_{C1-2}/ПДК$	1,75	6,73	1,77	0,93	1,53	1,81	2,12	1,23	5,98	0,95	0,97	0,99	1,81	1,99
$\Sigma_{C1-2}/МРС$														

Примечание: скв. (н) и скв. (э) – скважины наблюдательная и эксплуатационная; I – Алтай-Саянская гидрогеологическая складчатая область; II – Западно-Сибирский артезианский бассейн; ПО – перманганатная окисляемость;  $\Sigma_{\text{зи}}$  – сумма главных ионов;  $\Sigma_{C1-2}/ПДК$  – сумма соотношений фактических и предельно допустимых концентраций веществ первого и второго класса опасности; прочерк («-») – отсутствие данных.

Note: well (ob) and well (op) – wells observational and operational; I – Altai-Sayansk hydrogeological folded region; II – West Siberian artesian basin; PO – permanganate oxidizability;  $\Sigma_{\text{zi}}$  – sum of the main ions;  $\Sigma_{C1-2}/MPC$  – sum of ratios actual and maximum permitted concentration of substances of the first and second hazard class; the crossed out section («-») – lack of data.

**Таблица 2.** Химический состав подземных вод в бассейне Верхней Оби по результатам отбора проб в 1998 г.

**Table 2.** Chemical composition of groundwater in the Upper Ob basin according to the results of sampling in 1998

Показатель Indicator	Номер пункта пробоотбора на рисунке/Sampling point number in figure									
	11	14	15	16	12	17	18	19	20	21
Пункт Point	Курай Kuray	Чибит Chibit	Онгудай Ongudai	Муны Muny	Турочак Turochak	Тальменка Talmenka	Баюновские Ключи Bayunovskie Klyuchi	Эстонка Estonka	Томск Tomsk	Томский водозабор Tomsk water intake
Место отбора пробы Place of sampling	скв. (э) well (op)	родник spring	скв. (э) well (op)	скв. (э) well (op)	родник spring	скв. 56 (э) well (op)				
Возраст отложений Age of deposits	R <sub>3</sub> -V+Q	C <sub>2</sub> -O	Q+D <sub>1-2</sub>	Q	Q <sub>III</sub>	Q	aQ <sub>III</sub>	Q+P	C	P
Структура Structure	I	I	I	I	I	II	II	II	I	II
Широта/Latitude, °	50,21	50,30	50,73	50,73	52,26	51,82	53,15	55,54	56,47	–
Долгота/Longitude, °	87,94	87,52	86,12	85,75	87,13	83,57	83,50	83,80	85,04	–
Дата отбора Date of sampling	14.08	14.08	15.08	15.08	17.08	17.08	17.08	10.08	31.03	24.03
pH, ед. pH/Unit pH	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	6,80	7,40	6,80	7,00	7,20
ПО, мг О/дм <sup>3</sup> PO, mg O/dm <sup>3</sup>	0,60	1,80	2,20	0,20	0,62	2,27	0,72	9,58	0,21	0,82
мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>										
Σ <sub>гн</sub>	223,1	215,7	303,5	161,2	105,7	1206,0	371,3	535,4	309,6	572,5
Si	5,160	3,600	6,700	3,480	4,200	–	6,700	6,180	–	–
Fe	0,080	0,060	0,300	0,050	0,100	0,200	6,000	0,960	0,300	2,700
мкг/дм <sup>3</sup> /mkг/dm <sup>3</sup>										
Li	6,0	6,0	12,0	4,5	4,0	49,0	14,0	20,0	10,0	12,0
Cr	5,9	4,8	5,1	5,0	4,4	4,5	4,8	5,6	5,1	11,7
Co	0,22	0,25	0,28	0,27	0,18	0,47	0,19	0,24	0,22	0,36
Cu	0,8	0,4	1,2	1,0	1,5	2,0	<0,1	2,0	1,0	1,2
Zn	2,500	5,300	1,700	3,200	3,500	1,100	3,000	28,000	2,800	5,000
As	0,17	<0,10	0,14	0,46	1,69	<0,10	6,36	4,76	–	–
Br	0,1	3,9	1,2	2,7	1,1	59,8	8,7	14,6	10,3	28,2
Rb	<0,4	<0,4	3,0	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	6,0	<0,4	8,0
Sr	200	400	600	100	114	2500	500	1100	544	896
Ag	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,24	0,34	0,26	0,91	<0,01	0,26
Cd	<0,05	0,08	<0,05	0,100	0,100	0,060	0,080	0,100	0,070	0,100
Sb	0,21	0,23	<0,03	0,15	<0,03	0,19	<0,03	0,15	0,15	0,26
Cs	0,10	0,09	0,09	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ba	51,0	100,0	34,0	36,0	27,0	1941,0	79,0	489,0	48,0	–
Lu	<0,01	0,020	<0,01	0,020	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	–
Au	0,008	0,006	0,010	0,009	0,004	<0,002	0,008	0,017	0,067	0,067
Hg	0,033	0,060	0,090	0,070	0,030	0,150	0,040	<0,010	<0,010	<0,010
Pb	0,1	0,7	0,3	0,2	1,2	0,5	<0,1	1,0	0,1	0,7
Bi	–	0,003	0,001	0,002	0,004	0,013	0,003	0,007	–	0,500
La	0,150	0,190	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,150	0,290	<0,01
Ce	0,68	1,10	2,40	0,41	0,44	<0,06	0,36	0,94	<0,06	<0,06
Sm	0,10	0,15	0,19	0,06	0,03	0,24	0,070	0,090	0,12	0,18
U	0,17	0,82	1,20	0,29	0,14	0,49	<0,10	0,82	0,86	<0,10
ΣC <sub>1-2</sub> /ПДК ΣC <sub>1-2</sub> /MPC	1,01	1,13	1,58	0,94	1,09	5,92	2,21	3,09	0,71	1,05

Примечание: условные обозначения к табл. 1; в таблице не приведены данные о Se, Hf, Ta, Eu, Tb, Yb, Th, концентрации которых были меньше предела обнаружения.

Note: legends to table 1; data on Se, Hf, Ta, Eu, Tb, Yb, Th which concentration were less than limit of detection are not provided in the table.

### Заключение

Пресные подземные воды, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения в бассейне Верхней Оби, как правило, содержат значительное количество железа. Уровень содержания большинства изученных микроэлементов в подавляющем числе случаев меньше установленных в Российской Федерации нормативов качества. Однако, судя по показателю ΣC<sub>1-2</sub>/ПДК (табл. 1, 2), возможно их аддитивное токсичное воздействие на организм человека при

употреблении подземных вод без соответствующей водоподготовки на большей части рассматриваемой территории как по состоянию на 1998 г., так и в 2019 г. (табл. 1, 2).

Наиболее высокие значения ΣC<sub>1-2</sub>/ПДК (более 5; табл. 1, 2) отмечены для подземных вод в селах Хабазино (2), Онгудай (9) и Тальменка (17) на территориях Алтайского края и Республики Алтай. С учетом установленных рудопроявлений [9, 10, 24, 25] и характера концентрирования в подземных водах регио-

на парагенетических ассоциаций химических элементов можно предположить существенный вклад природных факторов в формирование наблюдаемого

уровня содержания многих микроэлементов, в частности повышенные концентрации U и Hg в бассейне Катуня.

**Таблица 3.** Средние арифметические значения (A) концентраций главных ионов и погрешности их определения ( $\delta_A$ ) в подземных водах отложений разного возраста в бассейне Верхней Оби

**Table 3.** Arithmetic mean values (A) of the concentrations of the main ions and the errors of their determination ( $\delta_A$ ) in groundwater of sediments of different ages in the Upper Ob basin

Возраст Age	Показатель Indicator	$\Sigma_{гн}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Fe	Cu	Zn	Pb	Hg
		мг/дм <sup>3</sup> /mg/dm <sup>3</sup>								мкг/дм <sup>3</sup> /mkg/dm <sup>3</sup>			
Q	A	371,3	59,1	19,4	22,3	247,4	13,7	20,9	1,666	2,4	20,6	1,9	0,167
	$\delta_A$	37,7	6,7	4,9	5,0	23,0	3,5	7,0	0,384	0,5	6,9	0,6	0,049
N	A	622,0	67,1	27,0	55,8	327,0	17,3	97,0	–	–	–	–	–
	$\delta_A$	131,3	14,3	7,8	28,1	43,4	7,0	53,6	–	–	–	–	–
P	A	555,4	79,4	20,8	32,8	365,9	19,5	38,3	0,830	1,0	7,8	0,7	0,059
	$\delta_A$	46,4	9,6	2,9	11,0	25,1	5,2	16,9	0,297	0,1	2,7	0,2	0,029
K	A	410,7	58,0	8,1	42,0	301,3	5,7	7,2	–	–	–	–	–
	$\delta_A$	49,8	13,1	1,6	5,9	31,4	1,7	2,2	–	–	–	–	–
J	A	494,1	65,6	19,6	28,9	350,9	4,6	9,1	–	–	–	–	–
	$\delta_A$	28,0	10,0	2,9	12,6	28,1	1,1	6,4	–	–	–	–	–
C+P	A	383,3	47,9	9,9	25,0	287,1	5,6	7,7	1,084	3,0	13,5	1,3	0,111
	$\delta_A$	32,9	6,4	1,0	4,7	25,2	1,0	1,8	0,300	0,7	2,8	0,2	0,051
C	A	477,7	77,7	20,2	11,0	350,8	3,7	10,2	0,293	0,7	2,4	0,2	0,248
	$\delta_A$	38,9	5,4	4,4	2,4	26,5	0,7	2,6	0,108	0,1	0,3	0,1	0,132
D	A	398,0	64,9	15,7	28,0	242,1	15,1	64,4	0,588	2,1	1,1	0,1	0,035
	$\delta_A$	94,4	12,5	4,1	10,8	38,9	7,6	37,9	0,230	1,1	0,4	0,1	0,015
E	A	330,8	52,1	13,1	8,5	235,6	2,5	18,8	0,114	2,7	11,2	0,7	0,095
	$\delta_A$	9,6	2,0	0,7	0,8	5,2	0,6	2,6	0,049	1,2	2,6	0,1	0,031
PR	A	341,1	54,4	13,5	10,5	243,9	7,1	11,5	0,064	–	–	–	0,024
	$\delta_A$	17,4	4,7	1,2	1,4	14,7	2,2	2,3	0,014	–	–	–	0,006
в целом the whole	A	386,9	58,1	15,4	19,2	269,0	7,8	22,3	0,655	2,4	12,7	1,2	0,103
	$\delta_A$	12,5	2,1	1,1	1,9	7,2	1,0	3,4	0,099	0,4	2,1	0,2	0,020

С учетом статистически значимой (прямой) корреляционной связи между концентрациями Fe и микроэлементами целесообразно на всех водозаборах, независимо от содержания железа по результатам изысканий и мониторинга, осуществлять комплекс мероприятий по их снижению, что

с большой вероятностью приведет и к уменьшению значений аддитивного показателя  $\Sigma C_{1-2}$ /ПДК.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-55-80015.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. В.А. Нуднера. – М.: Недра, 1970. – 368 с.
2. Гидрогеология СССР. Т. 17. Кемеровская область и Алтайский край. – М.: Недра, 1972. – 398 с.
3. Hydrogeological Conditions Changes of Tomsk / V.D. Pokrovsky, E.M. Dutova, K.I. Kuzevanov, D.S. Pokrovsky, N.G. Nalivaiko // Russia IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27 (1). – Number of paper 012031.
4. Химический и микробиологический состав подземных вод децентрализованного водоснабжения южных и центральных районов Томской области / О.Е. Лепокурова, И.С. Иванова, С.Л. Шварцев, Ю.В. Колубаева, Н.Г. Наливайко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 29–41.
5. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
6. Редкоземельные элементы в подземных водах Томского водозабора / В.К. Попов, Е.Ю. Пасечник, П.И. Проценко, О.Ю. Гончаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 97–105.
7. Состояние геологической среды (недр) на территории Сибирского федерального округа в 2017 г. Информационный бюллетень. – Томск: Филиал «Сибирский региональный центр ГМЧН», ФГБУ «Гидроспецгеология», 2018. – Вып. 14. – 178 с.
8. Geochemical groundwater peculiarities of paleogene sediments in the Western Siberia artesian basin / A.A. Balobanenko, V. Lgotin,

- E.M. Dutova, A.N. Nikitenkov, I.V. Raduk, D.S. Pokrovsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016.
9. Катунь: экогеохимия ртуты / под ред. Н.А. Рослякова, А.Н. Дмитриева. – Новосибирск: СО РАН, 1992. – 180 с.
10. Экогеохимия Западной Сибири. Тяжелые металлы и радионуклиды / под ред. Г.В. Полякова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГиМ, 1996. – 248 с.
11. Appelo C.A.J., Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd edition. – London: CRC press, Balkema, 2004. – 683 p.
12. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publ., 2005. – 679 p.
13. Подземные воды мира: ресурсы, использование, прогнозы / под ред. И.С. Зекцера. – М.: Наука, 2007. – 438 с.
14. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2<sup>nd</sup> ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
15. Knox R.C., Sabatini D.A., Canter L.W. Subsurface transport and fate processes. – USA, Boca Raton, FL: Lewis Publ., 2018. – 430 p.
16. Surface and groundwater, weathering, and soils, treatise on geochemistry / Ed. by J.I. Drever. – Pergamon: Elsevier, 2005. – V. 5. – 644 p.
17. Identification of indicators of groundwater quality formation process using a zoning model / X. Jing, H. Yang, Y. Cao, W. Wang // Journal of Hydrology. – 2014. – V. 514. – P. 30–40.
18. Data for factor analysis of hydro-geochemical characteristics of groundwater resources in Iranshahr / H. Biglari, M. Saeidi, K. Karimyan, M.R. Narooie, H. Sharafi // Data in Brief. – 2018. – V. 19. – P. 548–563.

19. Шварцев С.Л., Колмаков Ю.С., Савичев О.Г. Базовые пункты гидрогеохимических наблюдений в бассейне Верхней Оби в 1998 году // Обской вестник. – 2001. – № 1. – С. 2–5.
20. Методические рекомендации по организации и ведению мониторинга подземных вод на мелких групповых водозаборах и одиночных эксплуатационных скважинах. – М.: Госцентр «Геомониторинг», 2000. – 31 с.
21. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
22. Manual on stream gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
23. ГОСТ Р 56060-2014. Производственный экологический мониторинг. Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов. – М.: Стандартинформ, 2015. – 5 с.
24. Недра России. Т. 1. Полезные ископаемые / под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смылова. – СПб.; М.: Горн. ин-т, Межрегион. центр по геол. картографии, 2001. – 547 с.
25. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / под ред. Е.Н. Трибунского, М.С. Паровинчака. – Кемерово: ООО «Сарс», 2001. – 214 с.
26. Железосодержащие подземные воды верхней гидрогеодинамической зоны центральной части Западно-Сибирского артезианского бассейна / И.С. Иванова, О.Е. Лепокурова, О.С. Покровский, С.Л. Шварцев // Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41. – № 2. – С. 164–179.
27. Савенко В.С. Полуэмпирическая математическая модель вторичного загрязнения водоемов растворенными формами железа и марганца // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 6. – С. 608–619.
28. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред. Н.П. Лавёров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
29. Савенко А.В. Комплексообразовательно-осадительные геохимические барьеры // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 472. – № 5. – С. 572–575.
30. Lepokurova O. Chemical elements migration in water-travertin system (Tomsk region, Russia) // E3S Web of Conferences. XVI International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and XIII International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference). – Tomsk, 2019. – V. 98. – Article number 07014.
31. Geochemistry of the rare earth elements in the sparkling groundwaters of the Caucasus ridge, Russia / E. Chirkova, E. Baranovskaya, N. Kharitonova, V. Lavrushin, G. Chelnokov, I. Bragin // E3S Web of Conferences. XVI International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and XIII International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference). – Tomsk, 2019. – V. 98. – Article number 01009.

Поступила 14.11.2019 г.

#### Информация об авторах

**Пасечник Е.Ю.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Гусева Н.В.**, доктор геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой – руководитель отделения геологии на правах кафедры Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Льготин В.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, директор филиала «Сибирский региональный центр Государственного мониторинга состояния недр» Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидроспецгеология».

**Балобаненко А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела государственного мониторинга за участками загрязнения подземных вод филиала «Сибирский региональный центр Государственного мониторинга состояния недр» Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидроспецгеология».

**Домаренко В.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Владимирова О.Н.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314.6(282.256.1)

## TRACE ELEMENTS COMPOSITION OF UNDERGROUND WATERS OF THE UPPER HYDROGEOLOGICAL ZONE IN THE BASIN OF UPPER OB AS A FACTOR OF FORMATION OF THEIR ECOLOGICAL-GEOCHEMICAL CONDITION

**Elena Yu. Pasechnik<sup>1</sup>,**  
paseyu@yandex.ru

**Natalya V. Guseva<sup>1</sup>,**  
guseva24@yandex.ru

**Oleg G. Savichev<sup>1</sup>,**  
OSavichev@mail.ru

**Victor A. Lgotin<sup>2</sup>,**  
tgm@tgm.ru

**Andrey A. Balobanenko<sup>2</sup>,**  
baa@sfo.geomonitoring.ru

**Victor A. Domarenko<sup>1</sup>,**  
domarenkova@tpu.ru

**Olga N. Vladimirova<sup>1</sup>,**  
olechka-555-94@mail.ru

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

<sup>2</sup> Hydrospeitsgeologiya, branch of the Siberian Regional Center of the GMNS,  
99, Nikitin street, Tomsk, 634061, Russia.

**The relevance** of the research is defined by the need of accounting the fullest information on chemical composition of underground waters by their preparation for economic and drinking use. Earlier there were the data for the basin of Upper Ob mainly on macrocomponent structure, permanganate oxidizability, biogenic elements and content of limited quantity of minerals. This did not allow estimating the objective potential impact of regional factors with the toxicological and sanitary and toxicological limiting signs of influence.

**The main aim** of the research consists in assessment of microelement composition of underground waters of the operated horizons of the top hydrogeological zone in the basin of Upper Ob (in the territory of the Altai-Sayansk hydrogeological folded region and areas of the West Siberian artesian basin adjoining it).

**Objects:** the underground waters used for drinking water supply in the basin of Upper Ob (the territory of Altai Republic, Altai Krai, the Novosibirsk, Kemerovo and Tomsk regions).

**Methods:** the modern methods of definition of chemical composition of underground waters, including: in 2019 – mass and spectrometer method with inductively bound plasma (ICP MS); in 1998 – neutron activation analysis; statistical methods.

**Results.** The authors have carried out the analysis of chemical composition of the underground waters used for economic and drinking water supply in the basin of Upper Ob. The received results allow expanding significantly the idea of microelement composition of underground waters of the considered territory. It is shown that the level of content of the majority of the studied minerals is less than standards of quality established in the Russian Federation. However the index of the additive influence (the sum of the relations of the actual and maximum-permissible concentration of substances of 1–2 hazard classes of  $\Sigma C_{1-2}/MPC$ ) is frequently more than a unit that indicates potential toxic impact on health when using underground waters without the corresponding water treatment. The highest  $\Sigma C_{1-2}/MPC$  values (more than 5) are noted for underground waters in Altai Krai and Altai Republic, in the villages of Habazino, Onguday and Talmenka (reservoirs of inflows of Ob – the rivers Aley, Katun and Chumysh, respectively). Taking into account the established ore occurrences and the nature of concentrating of paragenetic associations of chemical elements in underground waters of the region, the authors made the assumption of substantial contribution of natural factors in formation of observed level of maintenance of many minerals.

### Key words:

Trace element composition, groundwater, Upper Ob, the Altai-Sayan hydrogeological fold region, the West Siberian artesian basin.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 18-55-80015.

### REFERENCES

1. *Gidrogeologiya SSSR* [Hydrogeology of the USSR]. T. 16. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti) [Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Ed. by V.A. Nudner. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
2. *Gidrogeologiya SSSR* [Hydrogeology of the USSR]. T. 17. Kemerovskaya oblast i Altaysky kray]. Vol. 17. Kemerovo region and Altai Territory. Moscow, Nedra Publ., 1972. 398 p.
3. Pokrovsky V.D., Dutova E.M., Kuzevanov K.I., Pokrovsky D.S., Nalivaiko N.G. Hydrogeological conditions changes of Tomsk. *Russia IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27 (1), Number of paper 012031.
4. Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Shvartsev S.L., Kolubaeva Y.V., Nalivaiko N.G. Chemical and microbiological composition of groundwaters of decentralized water supply of southern and central districts of Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 5, pp. 29–41. In Rus.
5. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, Iss. 13, pp. 1285–1398.
6. Popov V.K., Pasechnik E.Yu., Protsenko P.I., Goncharov O.Yu. Rare earth element content in groundwater of Tomsk water intake. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 97–105. In Rus.
7. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2017 g. Informatsionny byulleten* [Condition of geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2017. News bulletin]. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», FGBU «Gidrospeitsgeologiya», 2018. Vol. 14, 178 p.

8. Balobanenko A.A., Lgotin V., Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Raduk I.V., Pokrovsky D.S. Geochemical groundwater peculiarities of paleogene sediments in the Western Siberia artesian basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016.
9. *Katun: ekogeokhimiya rtuti* [Katun: Hydrargyrum ecogeochemistry]. Ed. by N.A. Roslyakov, A.N. Dmitriyev. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1992. 180 p.
10. *Ekogeokhimiya Zapadnoy Sibiri. Tyazhelye metally i radionuklidy* [Ecogeochemistry of Western Siberia. Heavy metals and radionuclides]. Ed. by G.V. Polyakov. Novosibirsk, SO RAN Publ., NITS OIGGiM Publ., 1996. 248 p.
11. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2<sup>nd</sup> ed. London, CRC Press, Balkema, 2004. 683 p.
12. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin, UNESCO Publ., 2005. 679 p.
13. *Podzemnye vody mira: resursy, ispolzovanie, prognozy* [Groundwater of the world: resources, use, forecasts]. under the editorship I.S. Zektser. Moscow, Nauka Publ., 2007. 438 p.
14. Weight W.D. *Hydrogeology Field Manual*. 2<sup>nd</sup> ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
15. Knox R.C., Sabatini D.A., Canter L.W. *Subsurface transport and fate processes*. USA, Boca Raton, FL, Lewis Publ., 2018. 430 p.
16. *Surface and groundwater, weathering, and soils, treatise on geochemistry*. Ed. by J.I. Drever. Pergamon, Elsevier, 2005. Vol. 5, 644 p.
17. Jing X., Yang H., Cao Y., Wang W. Identification of indicators of groundwater quality formation process using a zoning model. *Journal of Hydrology*, 2014, vol. 514, pp. 30–40.
18. Biglari H., Saeidi M., Karimyan K., Narooie M.R., Sharafi H. Data for factor analysis of hydro-geochemical characteristics of groundwater resources in Iranshahr. *Data in Brief*, 2018, vol. 19, pp. 548–563.
19. Shvartsev S.L., Kolmakov Yu.S., Savichev O.G. Basic points of hydrogeochemical observations in the basin of Upper Ob in 1998. *Obsskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 2–5. In Rus.
20. *Metodicheskie rekomendatsii po organizatsii i vedeniyu monitoringa podzemnykh vod na melkikh gruppovykh vodozaborakh i odinochnykh ekspluatatsionnykh skvazhinakh* [Methodical recommendations on organization and conducting monitoring of underground waters on shallow group water intakes and single operational wells]. Moscow, Gostsentr «Geomonitring», 2000. 31 p.
21. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezul'tatam mnogotsel'evogo geokhimiicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to production and results of multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000]. Ed. by E.K. Burenkov. Moscow, IMGRE Publ., 2002. 92 p.
22. *Manual on Stream Gauging*. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
23. GOST R 56060-2014. *Proizvodstvennyy ekologicheskiy monitoring. Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy na territoriyakh obektov razmeshcheniya otkhodo*. [State Standard R 56060-2014. Industrial environmental monitoring. Monitoring of the state and pollution of the environment on the territories of waste disposal facilities]. Moscow, StandardInform Publ., 2015. 5 p.
24. *Nedra Rossii* [Bowels of Russia] Vol. 1. Minerals. Ed. by N.V. Mezhelovsky, A.A. Smyslov. St. Petersburg; Moscow, Mount. institute, Mezhtregion. center for geol. cartography, 2001. 547 p.
25. *Tsirkon-ilmenitovye rossypnye mestorozhdeniya kak potentsialnyy istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Zircon-ilmenite loose fields as potential source of development of the West Siberian region]. Ed. by E.N. Tribunsky, M.S. Parovinchak. Kemerovo, OOO «Sars», 2001. 214 p.
26. Ivanova I.S., Lepokurova O.E., Pokrovskii O.S., Shvartsev S.L. Iron-containing groundwater in the upper hydrodynamic zone in the central part of West-Siberian artesian basin. *Water Resources*, 2014, vol. 41, Iss. 2, pp. 163–177.
27. Savenko V.S. A semiempirical mathematical model of the secondary pollution of water bodies by soluble iron and manganese forms. *Water Resources*, 2016, vol. 43, Iss. 6, pp. 862–872.
28. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of underground waters. Theoretical, applied and ecological aspects]. Ed. by N.P. Lavorov. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
29. Savenko A.V. Complexing–precipitating geochemical barriers. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 472, Iss. 2, pp. 205–207.
30. Lepokurova O. Chemical elements migration in water-travertin system (Tomsk region, Russia). *E3S Web of Conferences. XVI International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and XIII International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1<sup>st</sup> IAGC International Conference)*. Tomsk, 2019. Vol. 98, article number 07014.
31. Chirkova E., Baranovskaya E., Kharitonova N., Lavrushin V., Chelnokov G., Bragin I. Geochemistry of the rare earth elements in the sparkling groundwaters of the Caucasus ridge, Russia. *E3S Web of Conferences. XVI International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and XIII International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1<sup>st</sup> IAGC International Conference)*. Tomsk, 2019. Vol. 98, article number 01009.

Received: 14 November 2019.

#### Information about the authors

**Elena Yu. Pasechnik**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

**Oleg G. Savichev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Victor A. Lgotin**, Cand. Sc., associate professor, Hydrospetsgeologiya, branch of the Siberian Regional Center of the State monitoring of the state of the subsoil.

**Andrei A. Balobanenko**, Cand. Sc., head of the Department of groundwater quality state monitoring, Hydrospetsgeologiya, branch of the Siberian Regional Center of the State monitoring of the state of the subsoil.

**Victor A. Domarenko**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Olga N. Vladimirova**, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.643.001:536.2

## КОНДУКТИВНО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Половников Вячеслав Юрьевич,  
polov@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что тепловая защита оборудования и трубопроводов играет важную роль при проведении энергосберегающих мероприятий на объектах различного назначения, а рост уровня потерь теплоты или холода при транспортировке энергоносителей является причиной создания новых подходов к энергосберегающим мероприятиям при выполнении теплоизоляционных работ. Известно, что основным методом снижения потерь тепловой энергии при ее транспортировке и хранении является применение высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Таким материалом является тонкопленочная тепловая изоляция. Уникальные теплофизические характеристики тонкопленочных теплоизоляционных покрытий позволяют использовать их в различных энергетических системах и оборудовании. Несмотря на это технологии применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий к настоящему моменту времени не получили развития. Это объясняется рядом причин, основными из которых являются: недостаток знаний о физических свойствах и механизмах процессов теплопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях.

**Цель:** исследование кондуктивно-конвективного теплопереноса в слое тонкопленочных теплоизоляционных покрытий с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

**Объект:** цилиндрический слой тонкопленочных теплоизоляционных покрытий. На внутренней и внешней поверхностях тонкопленочных теплоизоляционных покрытий поддерживаются постоянные температуры. Геометрия тонкопленочных теплоизоляционных покрытий представляла собой связующее вещество и полые микросферы. Исследования проводились для слоя тонкопленочных теплоизоляционных покрытий толщиной 0,33 мм. Температуры на внутренней и внешней поверхностях тонкопленочных теплоизоляционных покрытий принимались в соответствии с экспериментальными данными. Предполагалось, что слой тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на 62 % состоит из микросфер диаметром 50 мкм и на 38 % из связующего вещества. Рассматривались два типа полых микросфер с толщинами стенок 5 и 2 мкм.

**Методы.** Решение поставленной задачи получено методом конечных элементов. Использовалась аппроксимация Галеркина, неравномерная конечно-элементная сетка. Параметры элементов сетки выбирались из условий сходимости решения. Увеличение числа элементов расчетной сетки проводилось с использованием метода Делоне.

**Результаты.** Выявлено влияние на тепловые потери вида связующего вещества и характеристик микросфер, толщины стенки микросферы и газовой фазы, содержащейся в полости микросферы. Для рассматриваемого случая отклонение от экспериментальных данных составило до 90 % в зависимости от состава тонкопленочных теплоизоляционных покрытий. Анализ результатов численного моделирования теплопереноса в слое тонкопленочных теплоизоляционных покрытий для кондуктивно-конвективной и кондуктивной моделей показал, что расхождение между ними не превышает 3 % и объясняется погрешностями численных расчетов. По этой причине в практических расчетах можно использовать более простую кондуктивную модель теплопереноса.

### Ключевые слова:

Тонкопленочная тепловая изоляция, энергосбережение, теплоснабжение, транспортировка и хранение энергии, моделирование.

### Введение

Тепловая защита оборудования и трубопроводов играет важную роль при проведении энергосберегающих мероприятий на объектах различного назначения [1–4]. Рост уровня потерь теплоты или холода при транспортировке энергоносителей является причиной создания новых подходов к энергосберегающим мероприятиям при выполнении теплоизоляционных работ. Основным методом снижения потерь тепловой энергии при ее транспортировке и хранении является применение высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Одними из таких материалов являются жидкокерамические материалы или тонкопленочные теплоизоляционные покрытия (ТПП) [5, 6].

Исследованиями теплопереноса в слое ТПП и эффективности их применения посвящено достаточное количество работ [5–20]. В них рассматриваются технологии использования теплозащитных светопронус-

кающих ТПП [7–11], кондуктивный теплоперенос в слое ТПП [6, 12, 13], а также различные практические приложения [14–20], в которых учитывается влияние условий эксплуатации ТПП на уровень тепловых потерь оборудования и трубопроводов.

Исследования [6] показали, что наиболее вероятный состав ТПП включает в себя полые микросферы и многокомпонентное связующее вещество. Теплоперенос в газонаполненных полостях микросфер может осуществляться за счет теплопроводности и конвекции (радиационный теплообмен мало вероятен, поскольку разности температур в слое ТПП не превышают нескольких градусов [6]). По этой причине необходимым является исследование сопряженного кондуктивно-конвективного теплопереноса в рассматриваемой системе.

Целью работы является исследование сопряженного кондуктивно-конвективного теплопереноса в слое ТПП с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

### Постановка задачи

Рассматривается слой ТТП, состоящего из полых микросфер и связующего вещества. Предполагается, что на внутренней и внешней поверхностях изоляционного слоя поддерживаются постоянные температуры. На рис. 1 схематично представлена область, для которой была решена задача, учитывающая сопряженный теплоперенос в системе «полые микросферы – связующее вещество». Использование подхода такого рода к решаемой задаче обосновано в [21], поскольку из анализа размерных эффектов в проблемах переноса теплоты [22] известно, что нижней границей применения уравнений Навье–Стокса и законов теплопереноса Фурье и Ньютона–Рихмана является размер не менее 100 нм.

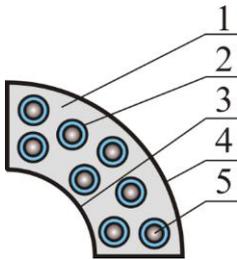


Рис. 1. Область решения задачи: 1 – связующее вещество; 2 – стенка микросферы; 3 – внутренняя поверхность изоляции; 4 – внешняя поверхность изоляции; 5 – полость микросферы

Fig. 1. Scheme of solution area: 1 – binder; 2 – surface of microspheres; 3 – inner surface of insulation; 4 – outer surface of insulation; 5 – microsphere cavity

Основные допущения, при которых решена задача, состоят в следующем:

1. Теплофизические свойства являются известными и постоянными величинами [23].
2. Газ в микросферах является несжимаемой средой [24].
3. Микросферы являются унифицированными по размеру и в слое изоляции располагаются упорядоченно.
4. На границах соприкосновения между микросферами и связующим веществом выполняются условия идеального теплового контакта.
5. Не учитывается теплообмен излучением и фазовые переходы в полостях микросфер и на внешней поверхности ТТП.
6. На внутренней и внешней поверхностях ТТП выставляются граничные условия первого рода.
7. Скорость газа на внутренней поверхности стенок микросфер равна нулю.

### Математическая модель

С учетом вышеописанных допущений математическая постановка задачи в обобщенном виде будет описываться:

в полостях микросфер уравнениями энергии, движения и неразрывности

$$C_{i,5} \rho_{i,5} (\bar{w}_{i,5}, \nabla T_{i,5}) = \lambda_{i,5} \nabla^2 T_{i,5}, \quad i = 1-n, \quad (1)$$

$$(\bar{w}_{i,5}, \nabla) \bar{w}_{i,5} = -\frac{1}{\rho_{i,5}} \nabla p_{i,5} + \nu_{i,5} \nabla^2 \bar{w}_{i,5} + \bar{F}, \quad i = 1-n, \quad (2)$$

$$\nabla \bar{w}_{i,5} = 0, \quad i = 1-n; \quad (3)$$

в связующем веществе и стенках микросфер уравнениями теплопроводности

$$\nabla^2 T_1 = 0, \quad (4)$$

$$\nabla^2 T_{i,2} = 0, \quad i = 1-n. \quad (5)$$

На внутренней и внешней поверхностях ТТП (рис. 1) значения температур считались постоянными:

$$T_{ins,3} = T_{in} = \text{const}, \quad (6)$$

$$T_{ins,4} = T_{ex} = \text{const}. \quad (7)$$

В местах соприкосновения между микросферами и связующим веществом выставлялись граничные условия четвертого рода:

$$\lambda_1 \text{grad}(T_1) = \lambda_2 \text{grad}(T_{i,2}), \quad T_1 = T_{i,2}, \quad i = 1-n. \quad (8)$$

Для стенок микросфер выполнялись условия симметрии:

$$\text{grad}(T_{i,2}) = 0, \quad i = 1-n. \quad (9)$$

На внутренней поверхности стенок микросфер скорость движения газовой фазы равна нулю:

$$w_{i,5} = 0, \quad i = 1-n. \quad (10)$$

Массовые силы в уравнении (2) вычислялись из следующих соотношений:

$$F_x = 0; \quad (11)$$

$$F_y = G \beta_{i,5} (T_4 - T_3), \quad i = 1-n. \quad (12)$$

Обозначения:  $C$  – теплоемкость;  $F$  – массовые силы;  $G$  – ускорение силы тяжести;  $T$  – температура;  $p$  – давление;  $w$  – скорость;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $\rho$  – плотность.

Индексы: 1–5 – в соответствии с рис. 1;  $ex$  – внешний;  $ins$  – изоляция;  $in$  – внутренний,  $n$  – количество микросфер, шт.

### Метод решения и исходные данные

Задача (1)–(12) решена методом конечных элементов [25] с использованием неравномерной конечно-элементной сетки.

Численное моделирование проводилось для слоя теплоизоляции толщиной 0,33 мм. Температуры на внутренней и внешней поверхностях изоляции принимались в соответствии с экспериментальными данными (табл. 1). Предполагалось, что слой ТТП на 62 % состоит из микросфер диаметром 50 мкм и на 38 % из связующего вещества. Рассматривались два типа полых микросфер с толщинами стенок 5 и 2 мкм. Микросферы по толщине ТТП располагались упорядоченно с «коридорным» вариантом размещения. Исследования проводились при значениях теплофизических характеристик рассматриваемой системы (рис. 1), описанных в [6, 23, 26].

В табл. 1 приведены результаты экспериментального определения тепловых потерь [6] ( $T_3$ ,  $T_4$ , К – температуры внутренней и наружной поверхностей,  $Q$ , Вт/м – линейные тепловые потери).

**Таблица 1.** Результаты экспериментального определения тепловых потерь [6]

**Table 1.** Results of experimental determination of heat loss [6]

$T_3$ , К	359,49	339,59	319,77
$T_4$ , К	363,15	343,15	323,15
$Q$ , Вт/м, W/m	27,09	25,84	24,20

**Результаты численного моделирования**

В табл. 2 приведены величины тепловых потерь теплопровода, имеющего слой ТТП, в зависимости от состава материала, вычисленные в соответствии исходными экспериментальными данными (табл. 1), для

**Таблица 2.** Результаты численного моделирования теплопереноса в слое ТТП при  $T_4=319,77$  К,  $T_3=323,15$  К

**Table 2.** Results of numerical simulation of heat transfer in the layer of thin-film thermal insulation at  $T_4=319,77$  К,  $T_3=323,15$  К

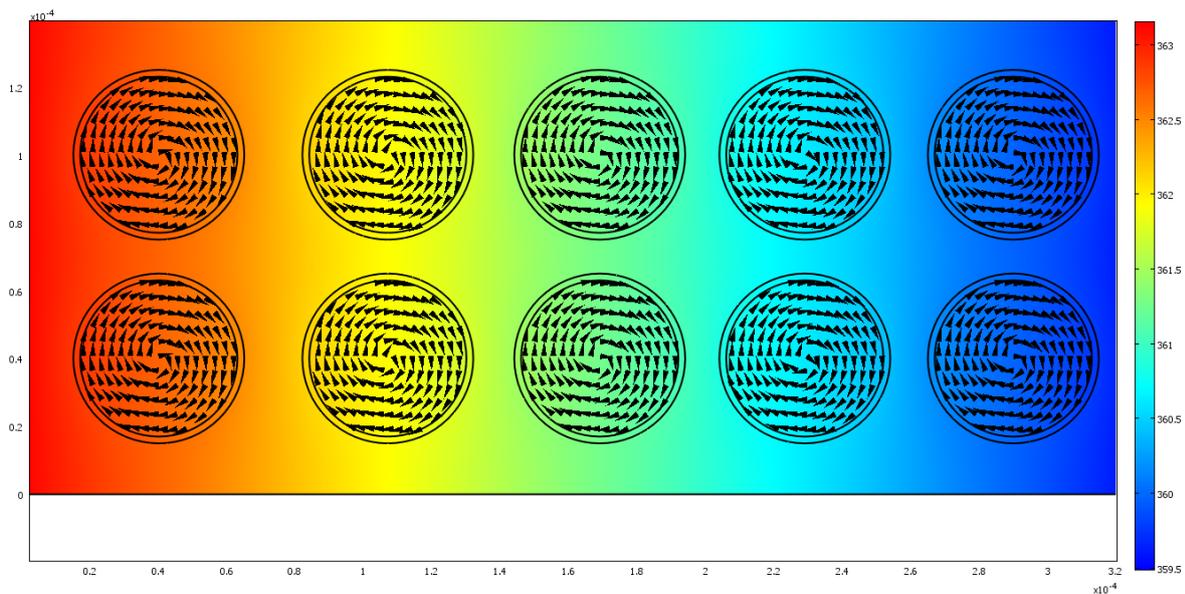
Состав тонкопленочного теплоизоляционного покрытия Composition of the thin-film insulation coating			$Q_1$	$Q_2$ [6]	$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} 100\%$	$\frac{Q - Q_2}{Q} 100\%$	
			Вт/м/W/m				
Толщина стенки микросферы (мкм) Microsphere wall thickness (microns)	5	Воздух Air	Трехкомпонентное связующее Three-component binder	47,45	48,03	1,21	49,59
			Однокомпонентное связующее Single component binder	123,40	120,00	-2,83	79,84
		CO <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	Трехкомпонентное связующее Three-component binder	52,33	51,99	-0,65	49,66
			Однокомпонентное связующее Single component binder	116,37	119,20	2,37	79,7
	2	Воздух Air	Трехкомпонентное связующее Three-component binder	28,31	28,12	-0,66	13,57
			Однокомпонентное связующее Single component binder	73,69	75,20	2,01	67,8
		CO <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	Трехкомпонентное связующее Three-component binder	30,18	30,56	1,25	20,81
			Однокомпонентное связующее Single component binder	75,32	74,08	-1,67	67,34

кондуктивно-конвективной  $Q_1$  и кондуктивной  $Q_2$  [6] моделей.

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод о существенном влиянии состава ТТП на тепловые потери теплопровода.

Сопоставление результатов численного моделирования тепловых потерь теплопровода, изолированного ТТП, с результатами экспериментальных исследований свидетельствует об их существенном расхождении (до 90 %) в зависимости от состава ТТП.

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что для практических расчетов можно использовать более простую кондуктивную модель [6], поскольку расхождение между расчетными значениями тепловых потоков для кондуктивно-конвективной и кондуктивной [6] моделей не превышает 3 %.



**Рис. 2.** Типичные поля скоростей в полостях микросфер ТТП и распределение температур в слое ТТП

**Fig. 2.** Typical velocity fields in the cavities of the microspheres of a thin-film thermal insulation coating and temperature field in the thin film insulation layer

На рис. 2 в качестве примера представлены фрагменты типичных полей температур и скорости в рассматриваемой области решения для случая, когда:  $T_4=359,49$  К,  $T_3=363,15$  К, связующее вещество – трехкомпонентное, материал стенок микросфер – стекло С38-1, толщина стенки 2 мкм, полости микросфер заполнены воздухом.

Из рис. 2 видно, что в полостях микросфер ТПП теплообмен осуществляется в условиях естественной конвекции в замкнутом пространстве [24]. Структура движения газовой среды в полостях микросфер тонкопленочного теплоизоляционного покрытия представляет собой замкнутые циркуляционные течения (максимальная скорость не превышает  $7 \cdot 10^{-4}$  м/с). Здесь необходимо отметить, что для рассматриваемой задачи значения чисел Грасгоффа составляют не более  $5 \cdot 10^{-7}$ . Это обстоятельство подтверждает возможность [24] использования более простой кондуктивной модели [6] при исследовании теплопереноса в ТПП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps / H. Wang, H. Wang, Zh. Haijian, T. Zhu // *Energy*. – 2017. – V. 138. – P. 1247–1262.
2. Половников В.Ю. Тепловые режимы и тепловые потери подземных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 124–131.
3. Thermal transient prediction of district heating pipeline: Optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation / Y. Wang, S. Youa, H. Zhanga, X. Zhenga, W. Zhenga, Q. Miaoa, G. Luc // *Applied Energy*. – 2017. – V. 206. – P. 900–910.
4. Селиванова З.М., Павлов В.И. Интеллектуальная информационно-измерительная система теплофизических свойств теплоизоляционных покрытий магистральных трубопроводов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 145–154.
5. Choice and optimization of ratio of components to develop fast-mounted thermostable heat-insulating constructions / N.A. Loginova, S.V. Grigorev, E.E. Lapin, S.I. Pogorelov, A.V. Ryzhenkov // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63 (5). – P. 355–359.
6. Половников В.Ю. Кондуктивный теплоперенос в слое тонкопленочной изоляции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 189–197.
7. Chou H.M., Chen C.R., Wu T.N. New transparent thin films for thermal insulation // *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C*. – 2015. – V. 36 (1). – P. 85–90.
8. The evaluation of energy saving using ultrathin heat insulation in railway electrification substation / H. Kim, J. Jang, S. Shin, Y. Park, S. Kim, H.R. Kim, B. Hyun, J. Kim // *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*. – 2015. – V. 64 (1). – P. 171–175.
9. Qi Y., Yin X., Zhang J. Transparent and heat-insulation plasticized polyvinyl chloride (PVC) thin film with solar spectrally selective property // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2016. – V. 151. – P. 30–35.
10. Patankar S.N., Kranov Y.A. Hollow glass microsphere HDPE composites for low energy sustainability // *Materials Science and Engineering*. – 2010. – V. 527. – P. 1361–1366.
11. Effect of hollow glass microsphere thin film on heat-insulation performance of building envelope / H. Wang, H.J. Fang, Q.D. Lan, S. He, C. Jiang // *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*. – 2014. – V. 48 (9). – P. 1341–1345.

#### Информация об авторах

**Половников В.Ю.**, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Распределения температур, приведенные на рис. 2, демонстрируют деформацию температурного поля, вызванную разнородностью теплофизических характеристик ТПП, что соответствует представлениям о процессах теплопереноса.

#### Заключение

Проведено исследование кондуктивно-конвективного теплопереноса в слое ТПП с учетом разнородности свойств микросфер и связующих веществ.

Анализ результатов численного моделирования теплопереноса в слое тонкопленочных теплоизоляционных покрытий для кондуктивно-конвективной и кондуктивной [6] моделей показал, что расхождение между ними не превышает 3 % и объясняется погрешностями численных расчетов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-48-700008-р\_а.*

12. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres / Y. Liao, X. Wua, H. Liua, Y. Chen // *Thermochimica Acta*. – 2011. – V. 526. – P. 178–184.
13. Numerical analyses of the thermal conductivity of random hollow sphere structures / T. Fiedler, R. Löffler, T. Bernthaler, R. Winkler, I.V. Belova, G.E. Murch, A. Öchsner // *Materials Letters*. – 2009. – V. 63. – № 13–14. – P. 1125–1127.
14. Evaluation of the thermal efficiency of a high-temperature heat-insulation structure based on honeycomb plastic / A.V. Ryzhenkov, E.E. Lapin, N.A. Loginova, D.R. Sitdikov, S.V. Grigorev // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63 (6). – P. 445–448.
15. Investigation of heat capacity of syntactic foam based on silicone and organic matrix / E.V. Belyaeva, N.A. Loginova, E.E. Lapin, S.I. Pogorelov, A.V. Ryzhenkov // *Oil Industry*. – 2016. – № 11. – P. 116–119.
16. Study of the influence of the modification of glass microspheres on the properties of syntactic foams based on oligomethylsiloxane / V.S. Osipchik, N.V. Kostromina, Y. Olikhova, V.N. Ivashkina, E.V. Belyaeva, N.A. Loginova, A.V. Ryzhenkov, E.E. Lapin // *International Polymer Science and Technology*. – 2016. – V. 43 (7). – P. 133–137.
17. Study of relations components for making flexible polymer insulation with optimum thermal and mechanical characteristics / S.V. Levitin, E.V. Belyaeva, N.A. Loginova, E.E. Lapin, A.V. Ryzhenkov // *Oil Industry*. – 2015. – № 9. – P. 130–133.
18. Review of binding agents in syntactic foams for heat-insulating structures in power industry Facilities / A.V. Ryzhenkov, N.A. Loginova, E.V. Belyaeva, Y.Y. Lapin, A.F. Prischev // *Modern Applied Science*. – 2015. – V. 9. – № 4. – P. 96–105.
19. Application of nanocomposite coatings to protect power equipment from droplet impingement erosion / V.N. Varavka, O.V. Kudryakov, A.V. Ryzhenkov, G.V. Kachalin, O.S. Zilova // *Thermal Engineering*. – 2014. – V. 61. – № 11. – P. 797–803.
20. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Integrated indentation tests of metal-ceramic nanocomposite coatings // *Inorganic Materials*. – 2015. – V. 51. – № 15. – P. 1508–1514.
21. Zhang Z. *Nano/microscale heat transfer*. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 479 c.
22. Flik M., Choi B., Goodson K. Heat transfer regimes in microstructures // *Journal Heat Transfer*. – 1992. – V. 114. – P. 667–674.
23. Bynum R.T. *Insulation handbook*. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 494 c.
24. Bejan A. *Convection heat transfer*. – New York: Wiley, 2004. – 696 c.
25. Garcia A.L. *Numerical methods for physics*. – San Jose CA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. – 432 c.

*Поступила 04.06.2019 г.*

UDK 621.643.001:536.2

## CONDUCTIVE-CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN THIN-FILM THERMAL INSULATION

Viacheslav Yu. Polovnikov,  
polov@tpu.ru

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

**The relevance** of the study is explained by the fact that thermal protection of equipment and pipelines is important when implementing energy-saving measures at energy facilities for various purposes. The increase in heat or cold losses during transportation of energy carriers is the reason for development of new approaches to energy-saving measures when performing thermal insulation actions. The main method of reducing heat energy losses during its transportation and storage is the use of highly efficient thermal insulation materials. This material is thin-film thermal insulation. The unique thermal characteristics of thin-film thermal insulation coatings are the reason for their use in various energy systems and equipment. Despite this, the technology of using thin-film insulating coatings has not been developed. This is due to the following reasons: lack of knowledge about the physical properties and mechanisms of heat and mass transfer in thin-film thermal insulation coatings.

**The main aim** of the research is to study the conductive-convective heat transfer in the layer of thin-film thermal insulation taking into account the heterogeneity of the properties of the microspheres and binders.

**The object** of the research is a cylindrical layer of thin-film insulating coating. The temperature is constant on the inner and outer surfaces of the thermal insulation coating. The geometry of the thin-film thermal insulation coating was a binder and hollow microspheres. Scientific research was carried out for a layer of insulation thickness of 0,33 mm. The temperatures on the inner and outer surfaces of the insulation were taken in accordance with the experimental data. The layer of thin-film thermal insulation for 62 % consists of microspheres with a diameter of 50 microns and for 38 % from binder. Two types of hollow microspheres with wall thicknesses (5 and 2  $\mu\text{m}$ ) were considered.

**Methods.** The solution of the problems posed is obtained by the finite element method. Galerkin approximation, non-uniform finite element mesh was used. The parameters of the grid elements were chosen from the conditions of convergence of the solution. An increase in the number of elements of the computational grid was carried out using the Delaunay method.

**Results.** The author has investigated the effect of the type of binder and the characteristics of the microspheres, the wall thickness of the microsphere and the gas phase contained in the cavity of the microsphere on heat loss. For the case under consideration, the deviation from the experimental data was up to 90 %, depending on the composition of the thin-film thermal insulation coating. Comparison of the results of numerical simulation of heat transfer in a layer of thin-film thermal insulation, performed using a conductive-convective heat transfer model with the results for a conductive model showed a discrepancy between them does not exceed 3 %. This is due to the errors in numerical calculations. For this reason, a simpler conductive model of heat transfer can be used in practical calculations.

### Key words:

Thin-film thermal insulation, energy saving, heat supply, transportation and storage of energy, modeling.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 18-48-700008-p\_a.

### REFERENCES

1. Wang H., Wang H., Haijian Zh., Zhu T. Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps. *Energy*, 2017, vol. 138, pp. 1247–1262.
2. Polovnikov V.Y. Thermal regimes and thermal losses of underground pipelines in real heat exchange on the outer interaction boundary. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 124–131. In Rus.
3. Wanga Y., Youa S., Zhanga H., Zhenga X., Zhenga W., Miaoa Q., Luc G. Thermal transient prediction of district heating pipeline: Optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation. *Applied Energy*, 2017, vol. 206, pp. 900–910.
4. Selivanova Z.M., Pavlov V.I. Intelligent information-measuring system of thermophysical properties of thermal insulation coatings of trunk pipelines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 145–154. In Rus.
5. Loginova N.A., Grigorev S.V., Lapin E.E., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V. Choice and optimization of ratio of components to develop fast-mounted thermostable heat-insulating constructions. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63 (5), pp. 355–359.
6. Polovnikov V.Yu. Conductive heat transfer in layer of thin-film thermal insulation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 189–197. In Rus.
7. Chou H.M., Chen C.R., Wu T.N. New transparent thin films for thermal insulation. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C*, 2015, vol. 36 (1), pp. 85–90.
8. Kim H., Jang J., Shin S., Park Y., Kim S., Kim H.R., Hyun B., Kim J. The evaluation of energy saving using ultrathin heat insulation in railway electrification substation. *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2015, vol. 64 (1), pp. 171–175.
9. Qi Y., Yin X., Zhang J. Transparent and heat-insulation plasticized polyvinyl chloride (PVC) thin film with solar spectrally selective property. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, vol. 151, pp. 30–35.
10. Patankar S.N., Kranov Y.A. Hollow glass microsphere HDPE composites for low energy sustainability. *Materials Science and Engineering*, 2010, vol. 527, pp. 1361–1366.
11. Wang H., Fang H.J., Lan Q.D., He S., Jiang C. Effect of hollow glass microsphere thin film on heat-insulation performance of building envelope. *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, vol. 48 (9), pp. 1341–1345.
12. Liao Y., Wua X., Liua H., Chen Y. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 526, pp. 178–184.
13. Fiedler T., Löffler R., Bernthaler T., Winkler R., Belova I.V., Murch G.E., Öchsner A. Numerical analyses of the thermal conductivity of random hollow sphere structures. *Materials Letters*, 2009, vol. 63 (13–14), pp. 1125–1127.
14. Ryzhenkov A.V., Lapin E.E., Loginova N.A., Sitdikov D.R., Grigorev S.V. Evaluation of the thermal efficiency of a high-temperature heat-insulation structure based on honeycomb plastic. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63 (6), pp. 445–448.

15. Belyaeva E.V., Loginova N.A., Lapin E.E., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V. Investigation of heat capacity of syntactic foam based on silicone and organic matrix. *Oil Industry*, 2016, no. 11, pp. 116–119.
16. Osipchik V.S., Kostromina N.V., Olikhova Y., Ivashkina V.N., Belyaeva E.V., Loginova N.A., Ryzhenkov A.V., Lapin E.E. Study of the influence of the modification of glass microspheres on the properties of syntactic foams based on oligomethylsiloxane. *International Polymer Science and Technology*, 2016, vol. 43 (7), pp. 133–137.
17. Levitin S.V., Belyaeva E.V., Loginova N.A., Lapin E.E., Ryzhenkov A.V. Study of relations components for making flexible polymer insulation with optimum thermal and mechanical characteristics. *Oil Industry*, 2015, no. 9, pp. 130–133.
18. Ryzhenkov A.V., Loginova N.A., Belyaeva E.V., Lapin Y.Y., Prischepov A.F. Review of binding agents in syntactic foams for heat-insulating structures in power industry Facilities. *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 96–105.
19. Varavka V.N., Kudryakov O.V., Ryzhenkov A.V., Kachalin G.V., Zilova O.S. Application of nanocomposite coatings to protect power equipment from droplet impingement erosion. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61 (11), pp. 797–803.
20. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Integrated indentation tests of metal-ceramic nanocomposite coatings. *Inorganic Materials*, 2015, vol. 51, no. 15, pp. 1508–1514.
21. Zhang Z. *Nano/microscale heat transfer*. New York, McGraw-Hill, 2007. 479 p.
22. Flik M., Choi B., Goodson K. Heat transfer regimes in microstructures. *Journal Heat Transfer*, 1992, vol. 114, pp. 667–674.
23. Bynum R.T. *Insulation handbook*. New York, McGraw-Hill, 2001. 494 p.
24. Bejan A. *Convection heat transfer*. New York, Wiley, 2004. 696 p.
25. Garcia A.L. *Numerical methods for physics*. San Jose CA, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 432 p.

Received: 4 June 2019.

#### Information about the authors

**Viacheslav Yu. Polovnikov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 627.8.059: 550.8.04

## ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

**Ахметов Ермек Мауленович<sup>1</sup>,**  
aem.47@mail.ru

**Асемов Камбар Мустафаевич<sup>1</sup>,**  
kassmov@kazkern.kz

**Жуматаева Марина Оразовна<sup>1</sup>,**  
j.marina07@rambler.ru

<sup>1</sup> Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, Казахстан, А10М6G5, г. Алматы, ул. Жандосова, 67.

**Актуальность исследования.** На сегодняшний день проблемы безопасности объектов водного хозяйства, в особенности плотин, дамб и других гидротехнических сооружений, остро стоят в обществе. Это связано, прежде всего, с большими экономическими, экологическими и социальными потерями, к которым приводят разрушения подобных объектов. В этой связи очевидна необходимость максимального снижения вероятности таких событий. Этот вывод в полной мере относится и к гидротехническим сооружениям в Республике Казахстан, большинство которых были построены в 60–80 гг. прошлого столетия и были случаи возникновения аварийных ситуаций. Наиболее значимые из них – прорыв земляных плотин в Кызылагаше в 2010 г. и в Кокпекты в 2014 г. В последнее время интенсивное развитие стало получать применение новых инновационных методов контроля за гидротехническими сооружениями, в том числе геофизических методов. Интерпретация результатов геофизических измерений может более детально охарактеризовать строение и физико-механические свойства пород, слагающих тело земляных плотин. В этом заключается актуальность данной работы, которую можно считать базой для проведения дальнейших исследований и применения геофизических методов на плотинах земляного типа в Республике Казахстан.

**Цель:** выбор оптимального комплекса геофизических методов для последующего опробования их на гидротехнических сооружениях земляного типа.

**Объектом** исследования являются причины аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля за их состоянием.

**Методика:** проведение анализа причин разрушений гидротехнических сооружений, анализ информативности геофизических методов при изучении строения плотин с обоснованием оптимального комплекса для диагностики и прогнозирования технического состояния земляных плотин.

В результате исследования выбран оптимальный комплекс геофизических методов: электрическая и сейсмическая разведка, георадарное зондирование. Данный комплекс будет в дальнейшем опробован на плотинах земляного типа.

### **Ключевые слова:**

Гидротехнические сооружения, безопасность, методы контроля, геофизические методы, оптимальный комплекс, земляные плотины в Республике Казахстан, базы данных.

### **Введение**

Объекты, применяемые в водном хозяйстве, называются гидротехническими сооружениями (ГТС). Гидротехнические сооружения классифицируются на следующие типы: плотины, здания гидроэлектростанций, водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы, судоподъемники, доки; сооружения, предназначенные для защиты от наводнений и разрушений берегов морей, озер и водохранилищ, берегов и дна русел рек; сооружения (дамбы), ограждающие золошлакоотвалы и хранилища жидких отходов промышленных и сельскохозяйственных организаций и другие, целевое назначение которых направлено на защиту от отрицательного действия вод и жидких отходов [1].

В литературе [2] приводится, что порядка 52 тыс. высоких плотин относятся к постройкам прошлого столетия, в том числе около 40 тыс. после 1950 г. Данное количество намного превышает число построек по сравнению с предшествующими 5000 лет. На данный

момент с помощью водохранилищ регулируется более 10 тыс. км<sup>3</sup> речных вод из общего объема 38,3 тыс. км<sup>3</sup>. Вода водохранилищ применяется для полива 270 млн га сельскохозяйственных земель, выработки 2460 млрд кВт.ч энергии (20 % всей потребляемой энергии), для снабжения питьевой и технической водой, также на берегах водохранилищ строят здания различного назначения. В пяти наиболее развитых странах мира находится ¼ общего количества ГТС, из которых 79 % высотой не более 30 м, а всего 1 % выше 100 м (энергетические сооружения) [2]. Эти данные свидетельствуют о крайней важности гидротехнических сооружений для хозяйственной деятельности. При этом обеспечение безопасности и устойчивости ГТС есть главный критерий при постройке плотин, являющихся потенциально опасными гидродинамическими сооружениями. Здесь же приводятся случаи аварий на крупных плотинах мира, которые привели к катастрофическим последствиям: человеческим жертвам, экономическому, экологическому и социальному урону, убыткам и ущерbam.

В различных странах, как и в Казахстане, периодически происходят аварии на ГТС. Анализируя крупные из них, можно сказать, что это происходит по причине нарушения норм и правил безопасности ГТС в процессе проектирования, строительства и эксплуатации, ненадлежащей организации надзора за безопасной эксплуатацией сооружений, недостатка квалифицированных специалистов и др. [2].

Систематический мониторинг ГТС, основанный на детальном обследовании, дает возможность заблаговременно выявить деструктивные зоны и элементы в теле сооружений, что позволит принять превентивные меры для предотвращения аварий. Для этих целей необходимо усовершенствование методов контроля, основанных на использовании инновационных научных разработок и современных аппаратурных средств.

**Анализ причин разрушений ГТС в зависимости от их конструктивных особенностей, возраста и условий эксплуатации, в том числе в Республике Казахстан**

Исследователями по использованию ГТС для хозяйственной деятельности отмечается важность обеспечения устойчивости и безопасности ГТС при разработке проектов на всех стадиях строительства сооружений и текущего ремонта и реконструкции этих объектов. Как показывает опыт эксплуатации, эффективность проектных решений может быть недостаточно высокой, если не будут применяться современные технологии мониторинга состояния ГТС для надёжной и безопасной эксплуатации на достаточно высоком техническом и организационном уровне.

В современном Казахстане, по данным источника [3], находятся 1665 ГТС. Из них 319 водохранилищ объемом более 1,0 км<sup>3</sup>, 443 плотины, 125 дамб и 778 других ГТС. Стратегически важными объектами являются 57 водохранилищ и 29 подпорных ГТС. В общей сложности из общего числа ГТС проведено обследование всего 1212 сооружений (73 %). Результаты обследования говорят об удовлетворительном состоянии всего 865 (52 %) объектов, остальным требуется ремонт. В основном сооружения находятся в эксплуатации свыше 30–50 лет с момента их строительства. Диагностика этих сооружений показало износ более 60 %, что снижает устойчивость ГТС.

В источнике [4] отмечено, что в настоящее время в Казахстане не существует специального законодательства, регулирующего вопросы обеспечения безопасности ГТС. Водный кодекс Республики Казахстан является главным правовым документом в вопросах регулирования использования водных ресурсов. Также указывается, что на сегодняшний день стоит острая необходимость разработки и принятия законодательного документа по безопасности ГТС, который отрегулирует многие правовые аспекты по обеспечению безопасности ГТС, работам, связанным с реконструкцией существующих и строительству новых объектов водного хозяйства, привлечению инвестиций, включая зарубежные [4]. Также данный документ позволит решить межгосударственные вопросы эффективного пользования вод трансгранич-

ных рек и сохранения экологически равновесного состояния водных бассейнов.

Причинами морального и физического износа всего комплекса ГТС являются большой период пользования и малый объем финансирования на эксплуатационные расходы, текущие и капитальные ремонты, а также влияние климатических и сейсмических факторов. Близкое расположение к вредным производствам также является потенциальной угрозой безопасности ГТС.

Ниже представлены примеры прорыва плотин и их причины в Казахстане за последние 10 лет [3]:

- 2009 г. В результате обильных дождей и плохого состояния ирригационной системы была прорвана плотина в Шардаринском районе Туркестанской области, затоплению подверглись более 1000 домов, школа, больница и другие здания;
- 2010 г. Жертвами разрушения плотины в с. Кызылагаш Алматинской области и последующего паводка стали 43 человека, в т. ч. дети; ранено более 300 человек; разрушено и повреждено 440 домов;
- 2010 г. Разрушение береговой шпory р. Каратал в Алматинской области привело к подтоплению 38 домов села Еркино;
- 2010 г. В результате увеличения уровня воды в р. Усек Алматинской области произошел прорыв плотины, эвакуировано более 2 тысяч жителей с. Лесновка;
- 2014 г. Быстрое таяние снега привело к переполнению водохранилища и разливу р. Сырдарья в Кызылординской области, были подтоплены 3 поселка: Жанакорган, Бирлик, Жайылма;
- 2014 г. Разрушение плотины Кокпектинского водохранилища в Восточно-Казахстанской области привело к гибели 5 человек и подтоплению п. Кокпекты;
- 2014 г. Размыв плотины в с. Жумабек Карагандинской области;
- 2014 г. Из-за обильных дождей произошел прорыв плотины в Талгарском районе Алматинской области;
- 2015 г. В результате резкого весеннего потепления произошел прорыв на нескольких плотинах в Карагандинской области.

Для осознания факторов, приводящих к аварийным ситуациям на ГТС, необходимо проведение анализа причин разрушений ГТС и закономерностей возникновения рискованных ситуаций. Если плотина находится в критическом состоянии, необходимо принять меры для предотвращения и смягчения последствий возможных стихийных бедствий. Следовательно, необходимо твердое понимание причин разрушения плотин (например, способы разрушения, ключевые факторы, влияющие на состояние плотины).

Учеными из Китайской Народной Республики были проведены статистические анализы информации о разрушениях плотин [5]. Из литературных данных накоплена и скомпонована информация о более 900 случаях разрушения различных плотин по всему миру, включающих земляные, бетонные, кладочные и насыпные [6, 7].

Детально собирались характеристики плотин и информация о разрушениях. В общей сложности были проанализированы 593 случая разрушения земляных плотин четырех основных категорий: однородные земляные плотины, неоднородные земляные плотины, земляные плотины с диафрагмами, грунтовые плотины, облицованные бетоном.

Сравнительный анализ случаев разрушения различных типов плотин в процентном соотношении показывает, что 66 % случаев разрушения происходят с земляными плотинами. Если подойти к вопросу зависимости разрушения от высоты земляных плотин, то более половины составляют сооружения высотой менее 15 м. Очевидно, земляные плотины небольшой высоты имеют относительно более высокую вероятность разрушения.

Также рассматривалась связь разрушений с возрастом или сроком эксплуатации земляных плотин в момент их разрушений. Результаты анализа свидетельствуют, что плотины наиболее склонны к разрушению в их первый пятилетний срок эксплуатации (30,5 %), особенно в первый год после строительства (14,2 %). В промежутки 5–10 лет наступает «период затишья»; 10,5 % составляют плотины, разрушившиеся в возрасте 10–20 лет и 9,8 % – в возрасте 20–40 лет. Видимо, это связано физическим и моральным старением плотины.

Исследованиями [8–10] были определены множество причин разрушений, но назвать единственную причину очень затруднительно. Часто несколько причин взаимосвязаны друг с другом. Выделяется четыре категории основных причин аварии: перелив, проблемы с состоянием плотины, плохое управление и стихийные бедствия. Перелив связан с недостаточной пропускной способностью сооружения, экстремальным наполнением, превышающим проектные параметры водохранилища. К категории «проблемы с состоянием плотины» относятся: «водопроводящие каналы» в основании и в теле плотины, сдвиг тела плотины, «водопроводящие каналы» вокруг водосброса, состояние водосбросных устройств, «водопроводящие каналы» вокруг водопропускных труб и других встроенных конструкций. Здесь необходимо обратить внимание, что «водопроводящий канал» является общим термином, который описывает механизмы, связанные с просачиванием воды. Плохое управление – снижение пропускной способности водохранилища из-за чрезмерного заполнения до наводнения, плохое обслуживание и эксплуатация, несвоевременное удаление временного усиления гребня водослива, организационные проблемы, отсутствие ответственных лиц за управление плотинной. И наконец стихийные бедствия – землетрясение, война и террористическая атака, пробой защитной плотины и т. п.

Установлено, что большинство случаев аварий вызвано либо переполнением, либо проблемами технического состояния плотин. Эти две причины привели почти к 80 % всех разрушений плотин.

Очевидно, что основным фактором, влияющим на перелив через верх плотины, является недостаточность пропускной способности водосброса, что приводит к переполнению, особенно в сезон наводнений, и поэтому наиболее потенциально опасное место находится на водосбросе. Что касается «водопроводящего канала» в теле или основании плотины, то самым неблагоприятным фактором является трещина, которая может быть вызвана неравномерной осадкой, усадкой материала, дефектами основания и несовершенными стыками.

Таким образом, анализ вышеприведенных данных свидетельствует о том, что потенциально опасными местами плотины являются:

- основание плотины, что связано с оседанием гребня плотины, при этом уменьшается надводный борт, а это оседание часто связано с некачественным основанием;
- нисходящий склон плотины и эрозия материала нисходящего склона с течением времени, которая определяет, разрушится ли плотина в конечном счете или нет;
- водосброс, когда недостаточная пропускная способность водосброса является основной причиной переполнения, а переполнение и последующие разрушения плотин часто происходят в сезон наводнений.

Обобщенный анализ причин аварий на ГТС показывает, что они, являясь потенциально опасными объектами, требуют постоянного мониторинга их технического состояния всеми доступными методами и средствами с целью определения их устойчивости и безопасности.

Во многих странах мира приняты законодательные документы о безопасности ГТС, согласно которым организации, эксплуатирующие ГТС, составляют Декларацию безопасности для получения от уполномоченных органов разрешения на эксплуатацию сооружений. Это общепринятая международная практика.

Заключения, сделанные на основе анализа произошедших случаев прорывов ГТС, наводнений, подтопленных огромных районов в Казахстане, выявили, что в Казахстане не существует законодательных норм, включая Водный кодекс, которые обеспечили бы системную работу по организации безопасной эксплуатации плотин, предупреждению и ликвидации аварийных ситуаций на ГТС. Имеется только Приказ Министра сельского хозяйства от 2 декабря 2015 года № 19/1054, которым утверждены «Правила, определяющие критерии отнесения плотин к декларируемым» и «Правила разработки декларации безопасности плотины». Следовательно, вопрос государственного регулирования обеспечения безопасности ГТС является одним из принципиально важных. Кроме того, так как при чрезвычайных происшествиях с масштабными потерями, безусловно, будут правовые конфликты, для их разрешения также необходимы соответствующие законы и подзаконные акты.

Одной из важных причин аварий ГТС в республике является несвоевременное выполнение восстановительно-ремонтных работ, которые не проводятся из-за отсутствия финансирования или недостаточной информации о внутреннем физическом состоянии ГТС. Получение данной информации не обеспечивается в необходимом объеме применением гидрогеологических и инженерно-геологических методов и к тому же сопряжено с большим объемом буровых работ.

Согласно действующим в Казахстане и в ряде стран СНГ Правилам технической эксплуатации, надзор за техническим состоянием ГТС проводится в виде натуральных наблюдений геодезическими методами, визуально, также посредством контрольно-измерительных приборов [11]. Натурные наблюдения являются обязательной и важной частью декларации безопасности ГТС.

При визуальных наблюдениях осмотры основных конструкций объектов и близлежащих территорий проводятся регулярно в целях определения состояния ГТС, обнаружения дефектов и разрушительных процессов, понижающих надежность ГТС, а также для выявления необходимости в том или ином виде ремонтных работ [12].

Методика проведения визуальных и натуральных наблюдений ГТС изложена достаточно подробно в работах [12–14]. Однако некоторые вопросы, возникающие при обследовании ГТС, требуют целого ряда специальных исследований. Определение геометрических параметров сооружения и его осадки не является особенно сложным в отличие от весьма затруднительного определения суффозионных и увлажненных зон, порового давления и проникновения различных флюидов в основание и тело земляных плотин.

#### **Анализ информативности геофизических методов и их комплексного применения при изучении строения плотин и прогнозировании их состояния**

Известно, что искусственные водохранилища существенно влияют на динамическое состояние земной коры и изменяют физические свойства среды. Вопрос изучения динамических процессов можно решить посредством исследования изменения физических полей, создаваемых породами, составляющими тело плотины. Интерпретация этих полей позволит получить количественную характеристику об объекте, описывающую его физические и геометрические параметры. Геофизические методы позволяют определить эти параметры. При этом разработанные методические данные по геофизическому мониторингу необходимо использовать при оценке состояния и устойчивости, безопасности ГТС в помощь натурному наблюдению и визуальному осмотру. Необходимо отметить, что любое ГТС характеризуется своими параметрами и оптимальный состав геофизических методов зависит от конкретных характеристик ГТС.

Для оценки устойчивости и прогноза физического состояния ГТС большую перспективу имеет интенсивно развиваемое в последнее время применение геофизических методов неразрушающего наблюдения.

В этом направлении большой вклад внесли российские исследователи [15–19].

С целью выявления структурного строения и физико-механических свойств (ФМС) грунтов тела плотины авторы [15–18] усовершенствовали технологии проведения комплекса сейсморазведочных и электро-разведочных исследований. Для этого авторы исследований [15, 16] рассматривали вопросы:

- разработки сейсмогеологической модели ГТС на базе библиографических данных и параметрического бурения по исследуемому району;
- численного моделирования и оценки сейсмических методов для определения структуры и ФМС грунтов тела плотины;
- исследования состояния грунтов насыпных плотин с использованием сейсморазведочных методов для разработки определенной методики и соответствующей технологии с дальнейшим их апробированием на практике.

Авторами проведен анализ применяемых методов сейсмической разведки и выполнено моделирование с использованием компьютерной программы моделирования упругих волн FModel. Результаты моделирования выявили высокую эффективность метода при выделении деструктивных элементов в теле пяти-слойной модели. Вместе с тем авторы указывают на затруднения во время отработки и корреляции материалов, например, выявления преломляющих границ по первому вступлению. Предлагают способ, посредством которого можно разделить преломленные волны во вступлениях.

Опытные-методические исследования проводились на одном из ГТС разными способами мониторинга, где глубина изучаемого разреза составляла 15–20 м. Отрабатывались разные системы мониторинга методом преломленных волн (МПВ) и методом отраженной волны (МОВ) – точка возбуждения, точка приема, шаги дискретизации и длина записи. По результатам исследования авторы не смогли прийти к единому решению по выбору метода по причине присутствия интенсивных поверхностных волн. Проведя численное моделирование обоими методами, авторы приходят к мнению, что оба метода уверенно определяют скоростные характеристики геологического разреза ГТС. Отмечается, что при выявлении ФМС грунтов плотины применима одна ситуация – грунтовая наружность. При этом потребуется дополнительная информация, материалы микросейсмического и акустического каротажа. Даже при отсутствии этих данных необходим априорный геологический материал. Для детализации характера изменения ФМС внутри сейсмических слоев построены графики изменения физических параметров.

Таким образом, авторы на основе численного моделирования и опытно-методических работ решили нижеследующие задачи: на основе анализа строения грунтовых плотин края и априорных данных составлена сейсмогеологическая модель; исследованы особенности выполнения инженерных сейсморазведочных исследований для грунтовых плотин; решением

прямой задачи определена структура волновых полей; дана оценка результативности сейсморазведочных работ; экспериментальными работами с различными системами наблюдений для плотин с глубиной 15–20 м подобран наиболее рациональный метод исследования. Разработанная методика сейсморазведочных работ была применена при исследовании ГТС Пермского края (Российская Федерация).

В [17, 18] авторы рассматривали вопрос разработки методики и технологии оперативного контроля устойчивости и прогноза технического состояния нескольких земляных плотин для того же Пермского края, но уже с применением комплекса геофизических методов. Выбран комплекс геофизических методов – метод электрического зондирования (ВЭЗ), метод естественного электрического поля (ЕП), метод георадиолокационного зондирования, сейсморазведочный метод, использующий преломленные волны продольного и поперечного типа. Авторами в результате изучения структурного строения по параметрическим инженерно-геологическим скважинам грунтовых дамб была построена обобщенная физико-геологическая модель. Затем было выполнено численное решение с помощью специальных программ. Результаты моделирования показали уверенное дифференцирование разреза, и были определены потенциально рискованные зоны, их отличие по физическим характеристикам. Например, увлажненные зоны отличаются более низкими величинами удельного электрического сопротивления.

Отмечается, что по результатам физико-геологического моделирования по сейсмическим данным можно выделить грунты с низкими упругими свойствами. Полученные экспериментальные исследования волнового поля достаточно хорошо проявляются и во временном разрезе. Результаты сравнивались с данными параметрического бурения и дали положительную оценку применения сейсмических методов для определения состояния сооружения и ФМС грунтов.

По данным количественной интерпретации составлен шестислойный геоэлектрический разрез, подтверждающий типовую модель плотины. Данные ВЭЗ позволили определить области низких электрических сопротивлений, связанных с зонами повышенной влажности.

Таким образом, результаты исследований показали, что результаты сейсмической разведки и георадарного зондирования хорошо отображают структурное строение, а методы электрической разведки – водонасыщенность пород и зоны фильтрации.

Авторы работ [15–18] подготовили научно-обоснованную методику и технологию применения инженерно-геофизического комплекса для оценки технического и физического состояния ГТС.

Коллективом исследователей в 2002–2012 гг. проводились наблюдения динамики изменения физических параметров плотины Иркутской ГЭС (Российская Федерация) комплексными геофизическими методами [19]. Сравнение результатов разных методов

показывает, что отличие в них небольшое, т. е. в пределах погрешности интерпретации. В данных электроразведочных наблюдений не все однозначно. Повышения и понижения во времени электрического сопротивления объясняются повышением минерализации грунтовых вод и нарастанием фильтрации. Сравнение данных ВЭЗ с данными скважинных исследований показало, что данные работы являются перспективными для сбора данных, проведения различных расчетов устойчивости плотины, включая режимный мониторинг методом ЕП. При этом авторы связывают эпизодические отрицательные аномалии в ядре плотины с пористостью, водонасыщенностью и фильтрационными процессами.

В работе [20] для контроля за состоянием ГТС применили неразрушающий комплекс геофизических методов, таких как метод сопротивлений, георадарные исследования и электромагнитная проводимость. В качестве объекта опытных исследований и оценки возможности вышеназванных методов была выбрана старая дамба небольшой высоты (Чешская Республика), построенная еще в XV в., причем на дамбу отсутствовала документация о строении. Земляная насыпная дамба прошла реконструкцию в 2013 г. Дамба исследовалась двумя профилями, первый профиль – продольный по верху дамбы по всей ее длине, второй – поперечный по простираанию дамбы.

Решались следующие задачи: определение основания дамбы и его однородность; определение по физическому полю исходного материала дамбы и добавленных при реконструкции материалов; выявление увлажненных зон в теле дамбы; сравнение методов по определению технического состояния дамбы.

По результатам геофизических исследований авторы отмечают следующее:

- по данным метода сопротивлений, т. е. по повышенным значениям кажущегося удельного электрического сопротивления ( $\rho_k$ ), достаточно хорошо выделяется основание плотины, скорее всего сложенное валунно-галечными отложениями;
- пониженные значения  $\rho_k$  показывают увлажненные зоны в теле дамбы, причем четко выделяются старые и новые породы по относительно пониженным и повышенным значениям кажущегося сопротивления;
- только по поперечному профилю определяется предполагаемое направление конуса стока депрессионной зоны;
- менее информативными оказались георадарные исследования, но вместе с тем они достаточно хорошо выделяют приповерхностные увлажненные зоны.

Наиболее глубинным и информативным, по утверждению авторов, оказались методы сопротивления и электропроводности.

В работе [21] рассматривается использование геофизических методов для обнаружения потенциальных зон утечек, которые могут поставить под угрозу целостность насыпной плотины Витиневского водохранилища (Чешская Республика) с риском для населе-

ния. Для сопоставления данных и их оценки использовались три геофизических метода: электромагнитное профилирование, метод сопротивлений и метод ЕП.

Электромагнитные исследования проводились с целью быстрого сканирования всей площади плотины водохранилища. Генератор частоты передает синусоидное магнитное поле вертикальной/горизонтальной дипольной ориентации в различных частотах (6525, 13,025, 27,025 и 47,025 Гц). Приемник с такой же дипольной ориентацией принимает вторичное поле. Полученное вторичное магнитное поле состоит из мнимой части (противофазы), которая пропорциональна проводимости среды. Результаты сканирования приводятся в виде изолинии кажущегося удельного электрического сопротивления Ом/м, а не См/м. Полученные данные в дальнейшем проверялись данными кажущегося электрического сопротивления и естественного электрического поля. Удельное электрическое сопротивление в исследуемом участке варьирует в пределах 20–50 Ом/м, что соответствует песчанистой глине и суглинку. Общее снижение 8–24 Ом/м на выделенном участке по данным сканирования авторы интерпретируют как водонасыщенные зоны, представляющие области высокого риска. В средней части плотины режимные наблюдения (при полном и пустом резервуаре) методом естественного электрического поля проводились для подтверждения аномальных значений проводимости. Результаты подтвердили, что в зоне аномального значения проводимости выявлены участки с повышенной водонасыщенностью. Метод электромагнитного зондирования позволил определить слабые места, связанные с проводимостью. Эти результаты в дальнейшем использовались для применения метода сопротивлений и ЕП. Комплексная интерпретация всех трех методов позволила выявить ослабленные места в теле плотины.

Обзор методов для определения ослабленных зон в теле плотины представлен в [22]. Для этого предлагаются геофизические методы, например методы сопротивления, естественного электрического поля и электромагнитные методы.

Для определения состояния пород, слагающих земляную дамбу Адо-Экити в Юго-Западной Нигерии, был применен комплекс геофизических методов, таких как: метод сопротивлений и метод естественного электрического поля [23]. По результатам данных ВЭЗ составлен геоэлектрический разрез, показывающий структурное строение дамбы. Результаты интерпретации показывают, что верхняя часть дамбы сложена песчано-галечными породами, значение удельного сопротивления колеблется в пределах от 38–369 Ом\*м с толщиной 1,2–2,7 м. Ядро дамбы сложено породами с удельным сопротивлением от 38–175 Ом\*м, а толщина меняется от 9,6 до 14,2 м. Внутри ядра дамбы выделяется зона с удельным сопротивлением 90 Ом\*м, которое авторы связывают с влажностью, фильтрацией и возможным просачиванием воды. В основании дамбы в пределах 15–20 м залегают породы с высоким удельным сопротивлени-

ем от 335 до 3999 Ом\*м. Значения с низким удельным сопротивлением в ядре дамбы хорошо коррелируются с отрицательными значениями потенциалом ЕП. Авторы связывают такие зоны с фильтрационными процессами в ядре дамбы, которые в будущем могут привести к аварии.

В работе [24] приводятся исследования по определению геофизическими методами физического состояния земляной плотины Вольф Крик в штате Миссури (США). Применялся комплекс геофизических методов: электрическая томография, индуцированная поляризация и метод естественного электрического поля. Комплексная интерпретация данных измерений свидетельствует, что в теле плотины существуют две области, связанные с фильтрационным процессом. Это зоны стыка плотины с коренными породами и вокруг выпускного дренажного канала. Данные зоны в геофизическом поле характеризуются пониженным значением удельного сопротивления и отрицательными значениями естественного поля. Авторы надеются, что данные исследования помогут владельцу плотины принять решения по минимизации процесса утечки.

Применение электрометрических методов для определения физического состояния плотин и дамб приводится и в других исследованиях [25, 26]. Основными измеряемыми параметрами физического поля являются: удельное электрическое сопротивление, проводимость, поляризуемость и потенциал естественного поля. Если первые три параметра хорошо выявляют ослабленные и водонасыщенные зоны, то потенциал естественного поля определяет направление фильтрационного потока в теле плотины. Кроме электрометрических методов зарубежные исследователи предлагают применять сейсмические методы для определения структурного строения дамб или плотин. Все исследователи утверждают, что уровень современного состояния геофизики очень высок – подготовлена научная основа всех методов, созданы высокоточные измеряемые аппаратуры, программное обеспечение для обработки данных. Это позволяет решать проблемы диагностики физического состояния ГТС с применением геофизических методов.

Применение геофизических методов для оценки технического состояния ГТС в Республике Казахстан было отмечено в нескольких работах [27, 28]. В работе [27] приводятся результаты исследований методом радиолокационного зондирования технического состояния гидротехнических сооружений Капчагайского водохранилища на реке Или (Республика Казахстан). Исследования проводились на русловой и логовой плотинах. Результаты георадарных исследований свидетельствуют о возможности применения георадаров для выделения с достаточной уверенностью ослабленных зон или зон повышенной влажности в теле плотин. Авторы предлагают для изучения динамики таких зон проводить мониторинговые исследования в течение нескольких лет.

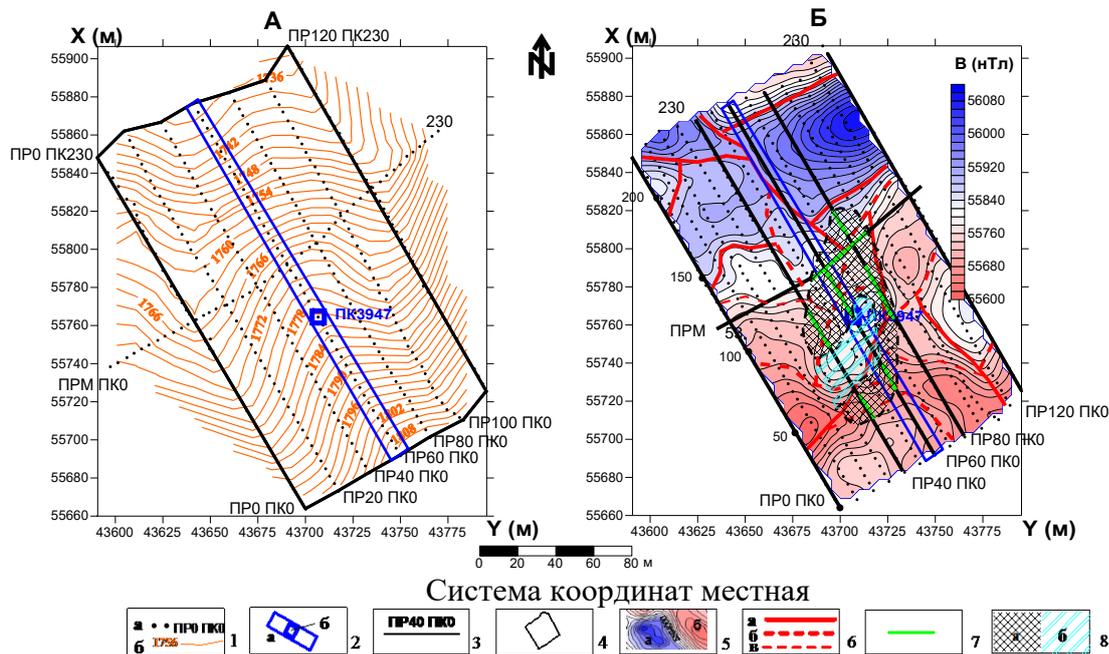
Для обеспечения безопасной эксплуатации Мойнакской ГЭС (Республика Казахстан) важным элементом являются достоверные данные по наличию и

глубине локальных обводненных зон, повышенной трещиноватости, как факторы, снижающие прочностные свойства горных пород в прикровельной части деривационного туннеля [28].

Для выполнения данной задачи на площади 120×320 м проведен комплекс геофизических съемок: площадная магнитная съемка, профильная электро-разведка методом сопротивлений и сейсморазведка МПВ. Результаты исследований свидетельствуют (рис. 1), что зоны разлома повышенной трещиноватости довольно хорошо выделяются пониженным значением магнитного поля, а локальные зоны – повышением электропроводности разреза и снижением в них граничной скорости упругих волн.

В ходе выполнения работ получены следующие результаты:

- по данным магнитометрической съёмки уточнена тектоническая обстановка по площадкам, включающим пикеты туннеля, в которых были установлены вывалы горных пород из его кровли. В целом по данным магнитометрических съёмок была создана фактурная основа для уточнения природы геоэлектрических и сейсмических аномальных эффектов по опорным профилям. Полученные данные могут быть использованы при необходимости детальных инженерно-геологических съёмок по обследованному интервалу створа туннеля;

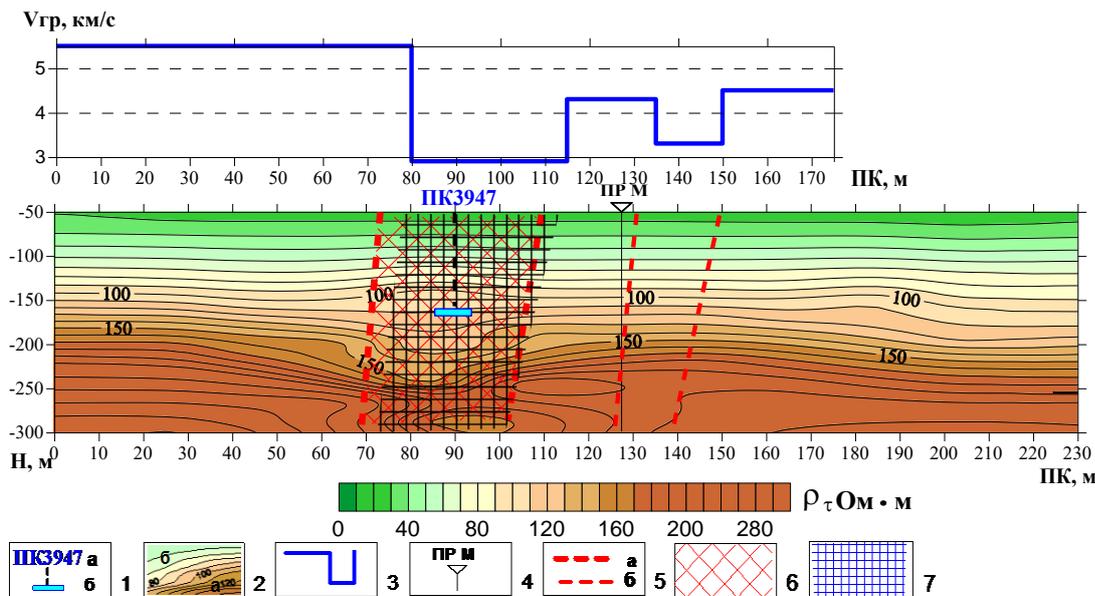


**Рис. 1.** Фрагмент деривационного туннеля Мойнакской ГЭС (ПК 3947). Схема отработки площадки комплексом геофизических методов (А) и её тектоническое строение (Б) по данным магнитометрической съёмки: 1) точки привязки пунктов геофизических наблюдений (а) и изолинии рельефа дневной поверхности (б); 2) фрагмент деривационного туннеля (а) и положение ПК 3947 (б); 3) профили электроразведочных и сейсморазведочных съёмок; 4) контур участка магнитометрической съёмки; 5) области аномально повышенных (а) и пониженных (б) значений модуля полного вектора магнитной индукции; 6) границы блоков магматических пород с различными магнитными свойствами: основные (а), второстепенные (б) и предполагаемые (в); 7) зоны пониженной граничной скорости на линии опорных профилей; 8) зоны пониженной (а) и повышенной (б) граничной скорости около ПК3947

**Fig. 1.** Fragment of diversion tunnel of Moinak Hydro Power Station (PK 3947). Scheme of site working-off by the complex of geophysical methods (A) and its tectonic structure (B) according to magnetometric survey: 1) anchor geophysical observations points (a) and isolines of surface relief (b); 2) fragment of derivational tunnel (a) and position of PK 3947 (b); 3) profiles of electrical and seismic surveys; 4) contour of magnetometric survey plot; 5) areas of abnormally increased (a) and reduced (b) module of absolute magnetic induction vector; 6) borders of igneous rocks blocks with various magnetic properties: main (a), secondary (b) and probable (c); 7) reduced boundary speed zones on the reference profiles line; 8) zones of reduced (a) and increased (b) boundary velocity near PK3947

- по сети опорных профилей методами электроразведки и сейсморазведки на каждой площадке проведена оценка глубинности и обводнённости выявленных тектонических структур (рис. 2). По наличию таких структур вблизи заданных пикетов створа туннеля и характерным особенностям их проявления в геофизических полях дана вероятностная оценка им как факторам, способствующим образо-

- ванию вывалов горных пород из кровли туннеля. При этом явных признаков пустот не обнаружено.
- однако в районах, расположенных в зонах влияния тектонических структур, по геофизическим данным признано, что такие структуры могут выступать в качестве фактора, способствующего образованию вывалов горных пород из кровли туннеля.



**Рис. 2.** Деривационный туннель Мойнакской ГЭС (ПК 3947). Оценка обводнённой тектонической трещиноватости скального фундамента по линии профиля 80: 1) пикет деривационного туннеля (а) и предполагаемых зон вывала (б); 2) изолинии электрического сопротивления; 3) графики граничной скорости по кровле скальных пород; 4) точка пересечения геофизических профилей; 5) разломы по данным электрического сопротивления: уверенно выделенные (а) и предполагаемые (б); 6) обводненные зоны с повышенной электропроводностью: уверенно выделенные (а) и предполагаемые (б); 7) зона обводнённой тектонической трещиноватости по данным электроразведки и сейсморазведки

**Fig. 2.** Diversion tunnel of Moinak Hydro Power Station (PK 3947). Assessment of water-bearing tectonic rock fracturing of rock foundation based by the profile line 80: 1) picket of derivational tunnel (a) and probable inrush zones (b); 2) resistivity isolines; 3) boundary velocity graphs along the rock roof; 4) intersection points of geophysical profiles; 5) faults according to electrical resistivity: confidently identified (a) and probable (b); 6) water-bearing zones with increased electrical conductivity: confidently identified (a) and probable (b); 7) water-bearing tectonic fracture zones according to electrical and seismic data

**Обоснование оптимального комплекса геофизических методов при диагностике и прогнозировании технического состояния грунтовых плотин в Республике Казахстан**

Как было описано выше, задача оценки уровня безопасности ГТС может быть решена при помощи проведения комплексных геофизических исследований. Из анализа работ [15–28] по применению геофизических методов контроля устойчивости, безопасно-

сти и прогноза технического состояния ГТС следует, что в основном применяются электроразведочные методы сопротивлений и ЕП, сейсмическая разведка в модификации МОВ и МПВ и георадарные исследования. В табл. 1 приводятся физические предпосылки применения инженерно-геофизических методов при обследовании плотин земляного типа.

**Таблица 1.** Физические предпосылки применения инженерно-геофизических методов для определения ослабленных и влагонасыщенных зон

**Table 1.** Physical prerequisites for using engineering-geophysical methods to determine the weakened and water-saturated zones

Эффекты и процессы Effects and processes	Проявление в физических характеристиках Manifestation in physical characteristics	Методы изучения Study methods
Ослабленные водонасыщенные зоны, трещины Weakened water-saturated zones, cracks	Снижение скорости упругих волн, плотности, повышение пористости Elastic waves and density speed reduction, porosity increase	Сейсморазведка Seismic exploration
Влагонасыщенные зоны в теле плотины Wet areas in the dam body	Локальное повышение электропроводности и поляризуемости Local increase of electrical conductivity and polarizability	Электроразведка методом сопротивлений Electrical Resistance Exploration
Фильтрационные процессы в теле плотины Filtration processes in the dam body	Уменьшение или увеличение фильтрационного поля Decrease or increase of filtration field	Электроразведка методом естественного электрического поля Natural electric field electrical exploration
Влагонасыщенные зоны в теле плотины Wet areas in the dam body	Увеличение диэлектрической проницаемости среды Increase of dielectric permittivity	Георадиолокационное зондирование GPR sounding

Комплексы геофизических методов основываются на петрофизических свойствах горных пород, слагающих тело ГТС (табл. 2) [29], (табл. 3) [30].

**Таблица 2.** Удельные электрические сопротивления (УЭС) некоторых осадочных горных пород

**Table 2.** Specific electrical resistivity (SER) of some sedimentary rocks

Наименование горной породы Rock name	УЭС, Ом*м/SER, Ом*m		
	мин min	Типичное typical	макс max
Глины/Clay	5	10	15
Суглинки/Loam	15	30	50
Супеси/Sandy loam	30	50	80
Пески водонасыщенные Saturated sands	50	80	200
Пески слабо увлажненные Slightly wet sands	100	150	500
Пески сухие/Dry sands	200	500	10000
Дресва/ Coarse sand	30	50	500
Вечномерзлые породы различной льдистости Permafrost rocks of various ice content	500	–	80000

**Таблица 3.** Изменение плотности, пористости и скоростей упругих волн для осадочных горных пород и сред

**Table 3.** Changes of density, porosity and elastic wave velocities for sedimentary rocks and media

Породы Rocks	Плотность $\sigma$ , / $\text{cm}^3$ Density, $\text{g}/\text{cm}^3$	Пористость $\eta$ , % Porosity, %	Скорости упругих волн Velocities of elastic waves		
			$V_p$ , км/с (km/s)		$V_s$ , км/с (km/s)
			Газонасыщенные Gas saturated	Водонасыщенные Water saturated	
Осадочные Скальные и полускальные Sedimentary Rock and half rock					
известняк limestone	2,6	2–25	2	6	3
доломит dolomite	2,7	2–17	1	5,5	2,5
мергель/marl	2,4	5–35	1,5	4,5	2
песчаники sandstones	2,5	2–35	1	4,5	1
Песчано-обломочные (рыхлые) гравийно-галечные пески Sandy-clastic (loose) gravel and pebble sands	3 1,3–2,0	2–20 2–40	0,8 0,5	2,5 2	0,5 0,2
Пластичные (глинистые) (глина, аргиллит) Plastic (clay) (clay, mudstone)	1,2–2,4	2–40	1,5	2,5	0,4

Характеристики петрофизических свойств пород, слагающих тело насыпных ГТС (табл. 2, 3), являются основанием применения геофизических методов: а) электроразведки; б) сейсморазведки; в) георадарного зондирования.

Теоретические основы инженерно-геофизических и георадиолокационных методов при решении инженерно-геологических задачи приводятся в [31–33].

Учитывая богатый опыт исследователей данной проблемы из ближнего и дальнего зарубежья, планируется распространить применение данных геофизических методов при обследовании состояния грунтовых плотин в Республике Казахстан.

#### Оценка состояния безопасности и управления гидротехническими сооружениями на основе создания базы данных

На наш взгляд, для оценки безопасности ГТС необходимо использовать всю накопленную в процессе эксплуатации ГТС информацию. Большие объемы этой информации необходимо хранить в памяти вычислительных комплексов по специальным правилам и принципам, позволяющим эффективно использовать их для обработки и интерпретации с целью дальнейшего прогнозирования состояния ГТС и принятия оптимального управленческого решения. При этом очень важно, чтобы организация данных и их хранение в различных технических средствах были выполнены по единой технологии, обеспечивая их использование для решения поставленных задач. Тогда задача сводится к организации баз данных (БД) и системы управления базами данных.

Основным назначением БД является накопление информации о техническом состоянии ГТС. Всю информацию, в том числе об инцидентах, необходимо перевести и сохранить в цифровом формате для анализа и использования при решении конкретных задач, возникающих в процессе эксплуатации ГТС. База данных должна на системной основе постоянно пополняться новыми данными. Чем больше информации о ГТС, тем большую ценность данные базы будут представлять. Для оценки опасности возникновения аварийных ситуаций разрабатывается база данных ГТС, структура и состав которой приведены в работе [34]. В работе [35] авторы предлагают интегрировать получение оперативной информации по результатам комплексных исследований ГТС в БД для дальнейшей обработки и сравнения с нормативными данными. Это позволит провести оценку текущего состояния ГТС и принятие организационных мер по предотвращению тяжелых последствий возможных аварий. Следует отметить, что создание БД потребует разработки и совершенствования нормативных документов по сбору и систематизации данных по ГТС и информации по мониторингу их состояния. Также потребуются принятие организационных мер в работе организаций, эксплуатирующих ГТС, что, соответственно, должно быть подкреплено дополнительным финансированием. В конечном итоге эти мероприятия приведут к существенному улучшению ситуации с безопасностью эксплуатации ГТС.

#### Выводы

1. Проведено обобщение и анализ причин аварии на гидротехнических сооружениях различного типа в странах дальнего и ближнего зарубежья и Респуб-

лики Казахстан. Дается оценка причин аварий, связанных с переливом, проблемами состояния плотины, плохим управлением, стихийными бедствиями и др. Отмечено, что в основном аварии происходят на земляных плотинах с высотой меньше 15 м (50,8 %) и с высотой 15–30 м (22,8 %). Причинами являются: перелив и проблемы, связанные с состоянием плотины. Определены опасные места, или зоны риска, в теле плотины: основание плотины, нисходящий склон и водосброс.

2. Применяемые в настоящее время натурные и визуальные наблюдения не дают полной картины технического состояния плотины. Необходимо использование современных достижений науки и техники в области инженерно-геологических изысканий. Таковыми являются геофизические методы неразрушающего контроля за состоянием плотин.
3. На опыте зарубежных исследователей гидротехнических сооружений по разработке комплексных инженерно-геофизических изысканий для диагностики технического состояния гидротехнических сооружений выбран оптимальный комплекс геофизических методов. В комплекс входят следующие методы: электроразведка (метод сопротивления) и метод естественного электрического поля; сейсмическая разведка и георадарная съёмка. Преимуществом применения геофизических методов обследования является то, что на основе измеренных данных геофизических полей можно построить физико-геологическую модель, харак-

теризующую неоднородность тела насыпной плотины, т. е. внутреннее строение плотины, и дать оценку его состояния.

4. Практически все исследователи физического и технического состояния гидротехнических сооружений геофизическими методами особо выделяют метод естественного электрического поля. Аномальные его значения на поверхности связаны с водонасыщенностью грунтов и фильтрационными процессами, слагающими тело плотины. Для раннего выявления таких опасных зон предлагается проводить режимные наблюдения. Выбор режима наблюдений зависит от поставленной задачи; режимы могут быть сезонные (весна, лето, осень) или длящиеся несколько лет.
5. Для эффективного управления техническим состоянием гидротехнических сооружений предлагается создание базы данных гидротехнических сооружений. В основу базы данных должны входить: информация инженерно-геологического, геофизического, геодезического содержания, данные по визуальным и натурным наблюдениям, данные контрольно-измерительной аппаратуры об инцидентах на гидротехнических сооружениях, а также о ремонтно-восстановительных работах.
6. Опыт различных исследователей по применению геофизических методов с целью оценки технического состояния ГТС будет опробован на земляных плотинах в Республике Казахстан в рамках грантового проекта Министерства образования и науки Республики Казахстан.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свод правил: СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. – М.: Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве, 2012. – 2 с.
2. Разработка и создание комплекса мероприятий по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений / под ред. Р.Р. Ходжаева. – Алматы: La Creation, 2014. – 428 с.
3. Шибутова Л. Вопрос предупреждения паводков в Казахстане: статистика разрушений // Regnum. 2017. URL: <https://regnum.ru/news/economy/2279631.html/> (дата обращения: 19.08.2019).
4. Нарбаев М. Обзор деятельности по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений в Казахстане // Международный семинар по безопасности гидротехнических сооружений. – СПб., 2017. URL: <http://kazaral.org/obzor-deyatelnosti-po-obespecheniyu-bezopasnosti-gidrotexnicheskix-sooruzhenij-v-kazaxstane/> (дата обращения: 19.08.2019).
5. Zhang M., Xu Y., Jia J.S. Analysis of earth dam failures – a database approach // ISGSR 2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk. – Shanghai, 2007. – V. 3 (3). – P. 184–189.
6. Vogel A. Safety investigations of accidents of dam constructions // Proc. of the 24th European Safety, Reliability & Data Association Seminar on Safety Investigations of Accidents. – Petten, Netherlands: JRC, 2003. – P. 144–151.
7. Singh V.P. Dam breach modeling technology // Water Science and Technology Library. – 1996. – P. 62–100.
8. Biswas A.K., Chatterjee S. Dam disasters – an assessment // Engineering Journal. – 1971. – V. 54 (3). – P. 3–8.
9. Johnson F.A., Illes P.A. Classification of dam failures // Water Power and Dam Construction. – 1976. – V. 28 (12). – P. 43–45.
10. Foster M., Fell R., Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents // Canadian Geotechnical Journal. – 2000. – V. 37. – № 5. – P. 1000–1024.
11. Черных О.Н., Доронкина О.А., Алтунин В.И. Анализ и оценка технического состояния грунтовых плотин по результатам натурных исследований // Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем: Материалы международной научно-практической конференции. – М., 2006. – Т. 2. – С. 527–533.
12. Обследование гидротехнических сооружений при оценке их безопасности / под ред. Г.М. Каганов, В.И. Волков, О.Н. Черных. – М.: Московский государственный университет природообустройства, 2001. – 60 с.
13. Результаты натурного обследования состояния постоянной плотины Ташлыкского водоема-охладителя Южно-Украинской АЭС / В.Ю. Егупов, А.И. Бондаренко, А. Волкова, О.В. Кичаева // Будівельні конструкції. – 2016. – Вип. 83 (2). – С. 591–598.
14. Кусаинов А.Б. Обследование гидротехнических сооружений с целью оценки безопасности. – Кокшетау: Кокшетауский технический университет Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан, 2013. – 41 с.
15. Определение физико-механических свойств грунтов при оценке состояния гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля / А.М. Пригара, А.В. Татаркин, А.В. Пенский, Б.М. Осовецкий, А.В. Коноплев // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84 (10). URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/13.pdf> (дата обращения: 20.06.2019).
16. Инженерно-геологическая оценка гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля / А.М. Пригара, Р.И. Царев, А.В. Коноплев, О.Г. Пенский, Б.М. Осовецкий // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-2. – С. 348–352.

17. Диагностика состояния земляных плотин методами неразрушающего контроля / В.П. Колесников, А.В. Татаркин, А.М. Пригара, А.В. Коноплев // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – Пермь: Пермский университет, 2009. – С. 257–262.
18. Технология комплексных инженерно-геофизических изысканий для диагностики состояния гидротехнических сооружений / В.П. Колесников, А.В. Коноплев, А.М. Пригара, А.В. Татаркин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7839> (дата обращения: 10.10.2018).
19. Динамика физического состояния ослабленных зон насыпной плотины Иркутской ГЭС за период 2002–2012 гг. / В.И. Джурик, А.Ю. Ескин, С.П. Серебренников, Е.В. Брыжак // Известия Иркутского государственного университета: Серия «Науки о Земле». – 2014. – Т. 8. – С. 35–41.
20. Geophysical evaluation of the inner structure of a historical earth-filled dam / D. Zumr, V. David, J. Krasa, J. Nedved // Proceedings. – 2018. – V. 2. – 664 p. URL: <https://www.mdpi.com/2504-3900/2/11/664/notes> (дата обращения: 23.07.2019).
21. Sentenac P., Benes V., Keenan H. Reservoir assessment using non-invasive geophysical techniques // Environmental Earth Sciences. – 2018. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F12665-018-7463-x.pdf> (дата обращения: 23.07.2019).
22. Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review / O.T. Kayode, A.M. Odukoya, T.A. Adagunodo, A.A. Adeniji // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 173. – P. 493–499. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/173/1/012026/pdf> (дата обращения: 13.09.2019).
23. Evaluation of subsurface conditions by geophysical methods at Ureje Earth Dam Embankment, Ado-Ekiti, Southwestern Nigeria – a case study / J.O. Fatoba, A.B. Eluwole, O.L. Ademilua, O.A. Sanuade // Indian Journal of Geosciences. – 2018. – V. 72. – № 4. – P. 275–282.
24. Dam seepage investigation of an Earthfill Dam in Warren County, Missouri using geophysical methods / S.C. Nwokebuihe, A.M. Alotaibi, A. Elkry, E.V. Torgashov, N.L. Anderson // AIMS Geosciences. – 2017. – V. 3 (1). – P. 1–13. URL: <https://www.aimspress.com/fileOther/PDF/geosciences/geosci-03-00001.pdf> (дата обращения: 13.09.2019).
25. Camarero P.L., Moreira C.A. Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique // REM – International Engineering Journal. – 2017. – V. 70. – № 1. URL: <http://www.scielo.br/pdf/remi/v70n1/2448-167X-remi-70-01-0047.pdf> (дата обращения: 13.09.2019).
26. Seepage investigation on an existing dam using integrated geophysical methods / N.K. Olanunmi, A. Aina, S. Olatunji, M. Bawalla // Journal of Environment and Earth Science. – 2018. – V. 8. – № 5. URL: <https://www.researchgate.net/publication/329443608> (дата обращения: 10.10.2019).
27. Бибосынов А., Шигаев Д.Т., Кирсанов А.В. Неразрушающий метод исследования Капчагайского гидротехнического сооружения // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан: Серия физико-математическая. – 2015. – Т. 6 (421). – С. 5–11.
28. Шайторов В.Н., Ахметов Е.М., Алдабергенова Г.И. Опыт применения геофизических методов при изучении тектонического строения разреза в створе деривационного туннеля Мойнакской ГЭС // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан: серия геологии и технических наук. – 2017. – Т. 1 (421). – С. 87–95.
29. Вертикальное электрическое зондирование / под ред. И.Н. Модина. – М.: Московский государственный университет, 2007. – 28 с.
30. Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2. Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 28 с.
31. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 501 с.
32. Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Ященко З.Г. Инженерная геофизика. – М.: Изд-во «Недра», 1989. – 252 с.
33. Владов М.Л., Золотарев В.П., Старовойтов А.В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований. – М.: МГУ, 1997. – 68 с.
34. Состав и структура электронной базы гидротехнических сооружений водохранилищ Республики Беларусь / Г.И. Касперов, В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов, А.В. Бузук // Труды Белорусского государственного технологического университета. – 2013. – № 2. – С. 232–233.
35. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник, Н.А. Калашник, Д.В. Запорожец // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2017. – Т. 20. – № 1 (1). – С. 13–20.

Поступила 16.12.2019 г.

#### Информация об авторах

**Ахметов Е.М.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан.

**Асемов К.М.**, главный специалист, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан.

**Жуматаева М.О.**, ведущий специалист, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан.

UDC 627.8.059: 550.8.04

## RESEARCH OF ACCIDENTS OF HYDRAULIC STRUCTURES AND SAFETY CONTROL METHODS

**Yermek M. Akhmetov<sup>1</sup>,**  
aem.47@mail.ru

**Kambar M. Assemov<sup>1</sup>,**  
kassmov@kazkern.kz

**Marina O. Zhumataeva<sup>1</sup>,**  
j.marina07@rambler.ru

<sup>1</sup> National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan, 67, Zhandossov street, Almaty, A10M6G5, Kazakhstan.

**The relevance of the research.** At present time the safety problems of water facilities, especially dams and other hydraulic structures are acute in the society. This is primarily due to the large economic, environmental and social losses, which lead to destruction of such facilities. In this regard, the need to minimize the likelihood of such events is obvious. This conclusion fully applies to the hydraulic structures in the Republic of Kazakhstan, most of which were built in the 60–80s of the last century and there were cases of emergency situations. The most significant of them are the breakthrough of earthen dams in Kyzylagash in 2010 and in Kokpekty in 2014. Recently, the use of new innovative methods for monitoring hydraulic structures, including geophysical methods, is intensively developing. Interpretation of geophysical measurements results can describe the structure and physicomaterial properties of the earth dams body in detail. This is the relevance of this work, which could be considered as a basis for further research and application of geophysical methods on the earth dams in the Republic of Kazakhstan.

**The aim** of the research is to select the optimal complex of geophysical methods for their subsequent testing at the earth hydraulic structures.

**Object** of the research is the causes of hydraulic structures accidents and the methods for their condition monitoring.

**Methodology:** analysis of the causes of hydraulic structures destruction, analysis of the informativeness of geophysical methods for dams structure studying with justification of the optimal complex for diagnosis and prediction of the earth dams technical condition.

As a result of study the optimal complex of geophysical methods was selected: electrical and seismic exploration, georadar sounding. This complex will be further tested on the earth dams.

**Key words:**

Hydraulic structures, safety, control methods, geophysical methods, optimal complex, earth dams in the Republic of Kazakhstan, databases.

## REFERENCES

1. *Svod pravil: SP 58.13330.2012 Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozeniya i Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 33-01-2003* [Code of practice: SP 58.13330.2012 Hydrotechnical structures. Basic provisions. Updated version of SNiP 33-01-2003]. Moscow, Federal Center for Normalization, Standardization and Technical Conformity Assessment in Construction, 2012. 2 p.
2. *Razrabotka i sozdanie kompleksa meropriyatiy po obespecheniyu bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Development and creation of a set of measures to ensure the safety of hydro-technical structures]. Ed. by R.R. Hodzhaev. Almaty, La Creation, 2014. 428 p.
3. Shibusova L. Vopros preduprezhdeniya pavorodkov v Kazahstane: statistika razrusheniya [The issue of flood prevention in Kazakhstan: statistics of destructions]. *Regnum*, 2017. Available at: <https://regnum.ru/news/economy/2279631.html/> (accessed 19 August 2019).
4. Narbaev M. *Obzor deyatelnosti po obespecheniyu bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v Kazahstane* [Overview of the safety of hydraulic structures in Kazakhstan. International workshop on the safety of hydraulic structures]. St. Petersburg, Russia, 2017. Available at: <http://kazaral.org/obzor-deyatelnosti-po-obespecheniyu-bezopasnosti-gidrotekhnicheskikh-sooruzheniy-v-kazahstane/> (accessed 19 August 2019).
5. Zhang M., Xu Y., Jia J.S. Analysis of earth dam failures – a database approach. *ISGSR 2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk*. Shanghai, 2007. Vol. 3 (3), pp. 184–189.
6. Vogel A. Safety investigations of accidents of dam constructions. *Proc. of the 24<sup>th</sup> European Safety, Reliability & Data Association Seminar on Safety Investigations of Accidents*. Petten, Netherlands, JRC, 2003. pp. 144–151.
7. Singh V.P. Dam breach modelling technology. *Water Science and Technology Library*, 1996, pp. 62–100.
8. Biswas A.K., Chatterjee S. Dam disasters – an assessment. *Engineering Journal*, 1971, vol. 54 (3), pp. 3–8.
9. Johnson F.A., Illes P. A classification of dam failures. *Water Power and Dam Construction*, 1976, vol. 28 (12), pp. 43–45.
10. Foster M., Fell R., Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, vol. 37, no. 5, pp. 1000–1024.
11. Chernykh O.N., Doronkina O.A., Altunin V.I. *Analiz i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya gruntovykh plotin po rezul'tatam naturnykh issledovaniy* [Analysis and assessment of technical condition of soil dams according to the results of field studies]. *Rol prirodoobustroystva v obespechenii ustoychivogo funktsionirovaniya i razvitiya ekosistem. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The role of environmental management in ensuring the sustainable functioning and development of ecosystems. Materials of the international scientific and practical conference]. Moscow, 2006. Vol. 2, pp. 527–533.
12. *Obsledovanie gidrotekhnicheskikh sooruzheniy pri otsenke ikh bezopasnosti* [Inspection of hydraulic structures in assessing their safety]. Eds. G.M. Kaganov, V.I. Volkov, O.N. Chernykh. Moscow, Moscow State University of Environmental Engineering, 2001. 60 p.
13. Egupov V.Yu., Bondarenko A.I., Volkova A., Kichaeva O.V. Rezul'taty naturnogo obsledovaniya sostoyaniya postoyannoy plotiny Tashlyk'skogo vodoema-okhladitelya Iuzhno-Ukrainskoy AES [Field survey findings of the permanent dam status of the Tashlyk'sky reservoir-cooler of the South Ukrainian NPP]. *Budivelnii konstruktiv*, 2016, Iss. 83 (2), pp. 591–598.
14. Kussainov A.B. *Obsledovanie gidrotekhnicheskikh sooruzheniy s tselyu otsenki bezopasnosti* [Inspection of hydraulic structures to as-

- ness safety]. Kokshetau, Kokshetau Technical University of the Ministry of Emergencies of the Republic of Kazakhstan, 2013. 41 p.
15. Prigara A.M., Tatarkin A.V., Pensky A.V., Osovetsky B.M., Konoplev A.V. Determination of physical and mechanical properties of soils when assessing the condition of hydraulic structures using non-destructive testing methods. *Scientific journal of Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 84 (10). In Rus. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/13.pdf> (accessed 20 June 2019).
  16. Prigara A.M., Tsarev R.I., Konoplev A.V., Pensky O.G., Osovetsky B.M. Engineering and geological assessment of hydraulic structures with non-destructive testing methods. *Basic research*, 2014, no. 11-2, pp. 348–352. In Rus.
  17. Kolesnikov V.P., Tatarkin A.V., Prigara A.M., Konoplev A.V. Diagnostika sostoyaniya zemlyanykh plotin metodami nerazrushayushchego kontrolya [Diagnosis of earth dams state by non-destructive testing methods]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala. Materialy regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology and Minerals of the Western Urals. Materials of regional scientific and practical conference]. Perm, Perm University, 2009. pp. 257–262.
  18. Kolesnikov V.P., Konoplev A.V., Prigara A.M., Tatarkin A.V. Technology of complex engineering-geophysical surveys for diagnosing the state of hydraulic structures. *Modern problems of science and education*, 2012, no. 6. In Rus. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7839> (accessed 10.10.2018).
  19. Dzhurik V.I., Eskin A.Yu., Serebrennikov S.P., Bryzhak E.V. Dinamika fizicheskogo sostoyaniya oslablenykh zon nasypony plotiny Irkutskoy GES za period 2002–2012 gg. [Physical condition dynamics on the weakened zones of the bulk dam of the Irkutsk Hydroelectric Power Station for 2002–2012]. *Bulletin of Irkutsk State University: Series of «Earth Sciences»*, 2014. vol. 8, pp. 35–41.
  20. Zumr D., David V., Krasa J., Nedved J. Geophysical evaluation of the inner structure of a historical earth-filled dam. *Proceedings*, 2018, vol. 2, 664 p. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-3900/2/11/664/notes> (accessed 23 July 2019).
  21. Sentenac P., Benes V., Keenan H. Reservoir assessment using non-invasive geophysical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 2018. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12665-018-7463-x.pdf> (accessed 23 July 2019).
  22. Kayode O.T., Odukoya A.M., Adagunodo T.A., Adeniji A.A. Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 173, pp. 493–499. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/173/1/012026/pdf> (accessed 13 September 2019).
  23. Fatoba J.O., Eluwole A.B., Ademilua O.L., Sanuade O.A. Evaluation of subsurface conditions by geophysical methods at Ureje Earth Dam Embankment, Ado-Ekiti, Southwestern Nigeria – a case study. *Indian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 72, no. 4, pp. 275–282.
  24. Nwokebuihe S.C., Alotaibi A.M., Elkry A., Torgashov E.V., Anderson N.L. Dam seepage investigation of an earthfill dam in Warren County, Missouri using geophysical methods. *AIMS Geosciences*, 2017, vol. 3 (1), pp. 1–13. Available at: <https://www.aimspress.com/fileOther/PDF/geosciences/geosci-03-00001.pdf> (accessed 13 September 2019).
  25. Camarero P.L., Moreira C.A. Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique. *REM – International Engineering Journal*, 2017, vol. 70, no. 1. Available at: <http://www.scielo.br/pdf/remi/v70n1/2448-167X-remi-70-01-0047.pdf> (accessed 13 September 2019).
  26. Olasunkanmi N.K., Aina A., Olatunji S., Bawalla M. Seepage investigation on an existing dam using integrated geophysical methods. *Journal of Environment and Earth Science*, 2018, vol. 8, no. 5. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/329443608> (accessed 10 October 2019).
  27. Bibosynov A., Shigaev D.T., Kirsanov A.V. Non-destructive method for the study of the Kapchagai hydraulic structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan: Physics and Mathematics Series, Almaty*, 2015, vol. 6 (421), pp. 5–11. In Rus.
  28. Shaitorov V.N., Akhmetov E.M., Aldabergenova G.I. The experience of applying geophysical methods in the study of the tectonic structure of a section in the alignment of the diversion tunnel of the Moink Hydroelectric Power Station. *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan: Geology and technical sciences series, Almaty*, 2017, vol. 1 (421), pp. 87–95. In Rus.
  29. *Vertikalnoe elektricheskoe zondirovanie* [Vertical electrical sensing]. Ed. by I.N. Modin. Moscow, Moscow State University, 2007. 28 p.
  30. Khmelevskoy V.K. *Geofizicheskie metody issledovaniya zemnoy kory. Kn. 2: regionalnaya, razvedochnaya, inzhenernaya i ekologicheskaya geofizika* [Geophysical research methods of the earth's crust. B. 2. Regional, exploratory, engineering and environmental geophysics]. Dubna, International University of Nature, Society and Man «Dubna», 1999. 28 p.
  31. Ogilvi A.A. *Osnovy inzhenernoy geofiziki* [Fundamentals of engineering geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 501 p.
  32. Lyakhovitsky F.M., Khmelevskiy V.K., Yashchenko Z.G. *Inzhenernaya geofizika* [Engineering geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 252 p.
  33. Vladov M.L., Zolotarev V.P., Starovoitov A.V. *Metodicheskoe rukovodstvo po provedeniyu georadiolokatsionnykh issledovaniy* [Guidance on conducting georadar research]. Moscow, Moscow State University, 1997. 68 p.
  34. Kasperov G.I., Levkevich V.E., Pastukhov S.M., Buzuk A.V. The composition and structure of the electronic database for reservoirs of hydraulic structures of the Republic of Belarus. *Proceedings of Belarusian State Technological University*, 2013, no. 2, pp. 232–233. In Rus.
  35. Melnikov N.N., Kalashnik A.I., Kalashnik N.A., Zaporozhets D.V. Primenenie sovremennykh metodov dlya kompleksnykh issledovaniy sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy regiona Barentseva moriya [Application of modern methods for comprehensive studies of the state of hydraulic structures in the Barents Sea]. *Bulletin of the Murmansk State Technical University*, 2017, vol. 20, no. 1/1, pp. 13–20.

Received: 16 December 2019.

#### Information about the authors

**Yermek M. Akhmetov**, Cand Sc, associate professor, leading researcher, National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan.

**Kambar M. Assemov**, chief specialist, National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan.

**Marina O. Zhumataeva**, leading specialist, National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan.

УДК 550.42 (571.55)

## АЛЕКСАНДРОВСКОЕ ЗОЛОТОРУДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА ПОРОД И РУД

**Абрамов Баир Намжилович<sup>1</sup>,**  
b\_abramov@mail.ru

**Калинин Юрий Александрович<sup>2,3</sup>,**  
kalinin@igm.nsc.ru

**Боровиков Андрей Александрович<sup>2</sup>,**  
borovik@igm.nsc.ru

**Бадмацыренова Роза Александровна<sup>4</sup>,**  
roza1977@mail.ru

**Посохов Виктор Федорович<sup>4</sup>,**  
vitaf1@yandex.ru

<sup>1</sup> Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,  
Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, а/я 1032.

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>3</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

<sup>4</sup> Геологический институт СО РАН,  
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

**Актуальность** исследования состоит в необходимости расширения минеральной сырьевой базы России. Восточное Забайкалье является одним из старейших золотодобывающих регионов страны. Тем не менее даже в таком хорошо изученном регионе остро стоит вопрос о поисках и обнаружении новых рудных месторождений. Для успешного выполнения такой задачи необходимы данные детального изучения уже известных рудных месторождений, которые могут быть использованы для разработки научно обоснованных критериев поиска рудных месторождений и прогноза оруденения. К таким данным относятся определение источников рудоносных магматических расплавов, возраста и условий формирования золотого оруденения Александровского месторождения.

**Целью** исследования является доказательство участия в рудообразовании нескольких магматических очагов с разными характеристиками на основании результатов изучения особенностей распределения редкоземельных элементов в магматических породах и рудах, изотопного состава кислорода рудоносного кварца и серы сульфидов, а также выявление физико-химических условий формирования оруденения с помощью исследования флюидных включений в минералах.

**Объектом** исследования является Александровское золоторудное месторождение, расположенное в Восточном Забайкалье.

**Методы.** Для определения элементного состава пород использовался рентгенфлуоресцентный метод и стандартный химический анализ, концентрации редкоземельных элементов измерялись сорбционно-атомно-эмиссионным анализом с индуктивно-связанной плазмой (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ). Изучение изотопного состава серы сульфидов, содержания Au и Ag, изотопного возраста ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) проведено в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Флюидные включения в кварце рудных жил изучены традиционными методами термобарогеохимии и методом КР-спектроскопии.

**Результаты.** Определен возраст ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) синрудного серицита ( $162 \pm 2,3$  млн лет), соответствующий возрасту интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса. Установлено, что вариации изотопного состава кислорода рудоносного кварца, изотопов серы сульфидов соответствуют флюиду магматической природы. Анализ распределения редких и редкоземельных элементов указывает на то, что источниками оруденения были разноглубинные, в разной степени дифференцированные магматические очаги, функционировавшие как в верхней, так и в нижней континентальной коре. По данным исследования флюидных включений в кварце рудных жил, кристаллизация минеральных парагенезисов руд месторождения происходила в интервале температур от 150 до 402 °С. Продуктивная минеральная ассоциация формировалась при температуре 402–360 °С. Установлено участие в процессе рудообразования рудообразующих флюидов, различающихся по солево-составу, что указывает на разные условия генерации и природу рудообразующих флюидов. Отличительной особенностью месторождения является образование руд за счет разноглубинных, в разной степени дифференцированных рудоносных магматических источников.

### **Ключевые слова:**

Забайкалье, Александровское месторождение, золото, P3Э, изотопы кислорода и серы, флюидные включения.

## Введение

Александровское золоторудное месторождение расположено в восточной части Забайкальского края, в пределах Давенда-Ключевского рудного узла, входящего в золото-молибденовый пояс, выделенный С.С. Смирновым [1]. Месторождение открыто в 1944 г. старателями. В последующем поисково-разведочные и тематические работы были проведены коллективами Ключевского рудоуправления, Восточной экспедиции Читинского геологического управления, Львовского государственного университета. Месторождение было разведано подземными горными выработками. С 2013 г. месторождение обрабатывается ЗАО «Рудник Александровский». Руды месторождения в среднем содержат Au 6,7 г/т и Ag 2,2 г/т. В дополнение к ранее проведенным исследованиям нами получены новые данные по датированию возраста образования месторождения, минералогическому составу руд и физико-химическим условиям их образования. Выявлены петрогеохимические особенности магматических пород рудоносного амуджиканово-шахтаминского комплекса, развитых в пределах рудного поля месторождения.

## Методика исследования

Изучение элементного состава пород и руд проведено в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск), а также в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Содержания элементов определены РФА методом (аналитик Б.Ж. Жалсараев). Измерения концентраций редкоземельных элементов проведены ICP-AES методом (аналитики Т.И. Казанцева, А.А. Цыренова). Содержания Au и Ag определены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) атомно-абсорбционным методом (аналитик В.Н. Ильина). Определение изотопного состава кислорода проводилось в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) с использованием установки MIR 10-30 системы лазерного нагрева с лазером CO<sub>2</sub> мощностью 100 ватт и длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области, в присутствии реагента BrF<sub>5</sub> по методу [2]. Изучение состава минералов производилось в ГИН СО РАН на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (Oxford Instruments) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда меньше 0,5 нА, размере зонда 0,1 мкм. В режиме анализа время набора спектров составило 50 с. Определение изотопного возраста серицитов проведено <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar методом. Флюидные включения в кварце гидротермальных жил Александровского месторождения были исследованы методами крио-, термометрии (микротермокамера THMSG600 фирмы «Linkam» с диапазоном измерений –196 – +600°С (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Изучение состава газовой фазы и определение отдельных твердых фаз включений проводилось методом КР-спектроскопии при помощи спектрометра Jobin Yvon Lab RAM

HR800 (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Для идентификации отдельных дочерних фаз в многофазных включениях использовалась известная база КР-спектров RRUFF [3].

## Краткая характеристика геологического строения Александровского золоторудного месторождения

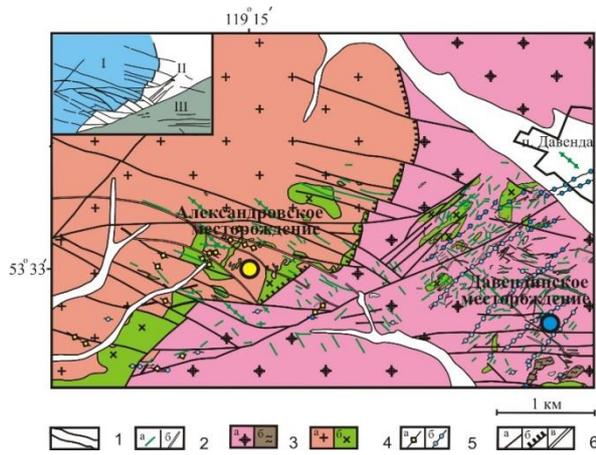
Александровское месторождение находится в Могочинском рудном районе Восточного Забайкалья в пределах Давенда-Ключевского рудного узла. Район месторождения расположен на юго-западной окраине Алдано-Витимского щита, в той ее части, которая примыкает в Монголо-Охотскому глубинному разлому.

В 1944 г. на Александровском месторождении Г.С. Лесковым была открыта жила № 3, которая в 1944–1948 гг. была отработана на 25–30 м от дневной поверхности. В последующем на площади месторождения были проведены поисково-разведочные и тематические исследования, в результате которых были получены данные по структурной позиции, вещественному составу пород и руд, закономерностям локализации оруденения. При этом недостаточно изученными остались условия и время образования руд месторождения.

В пределах Александровского рудного поля развиты магматические образования, относящиеся к нескольким разновозрастным формациям палеозойского и мезозойского возрастов. Стратифицированные образования верхнеархейского возраста, представленные метаморфогенными породами, имеют весьма незначительное распространение (рис. 1).

Установлена следующая возрастная последовательность формирования геологических комплексов, развитых на территории Александровского рудного поля и сопредельных площадях. Олекминский комплекс (PZ<sub>1</sub>): гнейсовидные порфиробластические биотитовые и биотит-амфиболовые граниты, гранодиориты, а также их жильные образования – пегматиты, пегматоидные граниты, аплиты, аплитовидные граниты. Бичурский комплекс (P<sub>2</sub>) объединяет позднепалеозойские образования габбро-гранитной формации, выделенные из объема амананского комплекса.

Первая фаза Бичурского комплекса представлена биотитовыми, амфибол-биотитовыми, амфиболовыми кварцевыми диоритами, диоритами и габбро-диоритами, вторая фаза – биотитовыми гранитами, гранодиоритами, третья фаза – порфиroidными гранитами, лейкогранитами, аплитами. Тематические исследования по расчленению геологических формаций Олекмо-Шилкинского междуречья, проведенные сотрудниками «Читагеология», показали, что абсолютный возраст (K-Ar метод) гранитоидов бичурского комплекса составляет 260–235 млн лет. В Джидинском рудном районе Бурятии с бичурским интрузивным комплексом связывается образование молибденового оруденения [5]. В Западно-Забайкальской части Селенгинского вулканно-плутонического комплекса с бичурским интрузивным комплексом также связано образование Кударинского порфиrowого медно-молибденового месторождения [6].



**Рис. 1.** Схема геологического строения района Александровского месторождения (по материалам А.В. Вареника [4], с дополнениями авторов): 1 – четвертичные отложения; 2 – Амуджикано-Шахтаминский комплекс  $J_{2-3}$ : а) лампрофиты, кварцевые диориты, б) гранит-порфиры, фельзиты (дайки); 3 – Бичурский комплекс  $P_2$ : а) гранитоиды, б) кварцевые диориты; 4 – Палеозойские интрузивные и осадочные породы ( $Pz$ ): а) гранитоиды, б) кристаллические сланцы; 5 – Сульфидно-кварцевые жилы: а) золоторудные, б) молибденовые; 6 – Тектонические нарушения: а) средне-крупномасштабные, б) надвиги, в) рудоконтролирующие. Во вставке показаны блоки: I – Северо-Давендинский, II – Юго-Восточный, III – Давендинский

**Fig. 1.** Schematic geological map of the Aleksandrovskoe deposit region: 1 – quaternary rocks; 2 – Amudzhikansky-Shakhtaminsky complex ( $J_{2-3}$ ): a) lamprophyres, quartz diorites, b) granite-porphry, felsite (dykes); 3 – Bichursky complex ( $P_2$ ): a) granitoids, b) quartz diorites; 4 – Paleozoic intrusive and sedimentary rocks ( $Pz$ ): a) granitoids, b) crystalline schists; 5 – Sulphide-quartz veins: a) gold ore, b) molybdenum; 6 – Tectonic faults: a) large and medium scale, b) thrusts, c) ore-controlled faults. The inset shows blocks: I – North-Davendinsky, II – South-East, III – Davendinsky

Интрузивные образования амуджикано-шахтаминского комплекса на прилегающих к месторождению площадях представлены исключительно породами дайково-жильной серии. Дайки представлены гранит-порфирами, гранодиорит-порфирами, кварцевыми диоритовыми порфирами, гибридными порфирами, субщелочными лейкократовыми гранит-порфирами, ортоклазитами, плагиоклазовыми порфирами, диоритовыми порфирами, фельзитами и фельзит-порфирами, аплитами, микродиоритами, диабазами, лампрофитами различного состава (спесартиты, малхиты, грорудиты, эссекситы, спесартиты, одиниты, слюдяные лампрофиты). Средний возраст гранитоидов амуджикано-шахтаминского комплекса составляет 167–150 млн лет [7, 8]. Установлено, что с ранней группой даек – гранит-порфирами, гранодиорит-порфирами, на площади рудного узла связано молибденовое и медно-молибденовое оруденение, локализующееся в зонах калишпатизации, окварцевания,

серицитизации. С поздними дайками – гибридными порфирами, лампрофитами, грорудитами, связано золотое оруденение в зонах березитизации, листовитизации, турмалинизации, окварцевания.

На Ключевском золоторудном месторождении, расположенном в пределах Давенда-Ключевского рудного узла, образование золотого оруденения также парагенетически связано с заключительными этапами образования даек амуджикано-шахтаминского комплекса (лампрофиты, гибридные порфиры) [9]. Породы, вмещающие золоторудное оруденение и слагающие большую часть площади Александровского месторождения, представлены главным образом гранитами бичурского комплекса ( $P_2$ ). Определяющее влияние на распределение золотого оруденения оказали узлы пересечения разломов северо-западного и северо-восточного простирания. К числу главных рудоконтролирующих структур относятся Главный и Александровский разломы. Основными рудовмещающими структурами являются сколовые трещины северо-западного простирания. Очень сильное влияние на локализацию оруденения оказал Пологий разлом. При пересечении его с крутопадающими жилами образуются прожилково-вкрапленные зоны, вытянутые в направлении линии их сопряжения. Вертикальный размах оруденения составляет около 200 м.

В пределах месторождения выделяются три геолого-структурных блока – Северо-Давендинский, Юго-Восточный и Давендинский (рис. 1). Северо-Западный блок сложен гранитоидами бичурского комплекса ( $P_2$ ), Юго-Восточный блок является смежным между Северо-Давендинским и Давендинским блоками. С Северо-Давендинским блоком связана золото-пирит-кварцевая стадия минерализации, с Юго-Восточным – пирит-кварц-турмалиновая стадия, с Давендинским – молибденит-кварцевая стадия. Границы между блоками выделены по зонам тектонических нарушений, оказавшим влияние на распределение золотого оруденения (рис. 1).

В северо-восточном направлении от Давендинского месторождения к Александровскому последовательно сменяют друг друга молибденит-кварцевые, турмалин-кварцевые, пирит-кварцевые и полисульфидно-кварцевые типы оруденения. Такая последовательность размещения оруденения близка к зональности медно-порфировых месторождений [10]. Отличия проявляются в отсутствии ярко выраженного порфирового ядра с тонковкрапленной медно-молибденовой минерализацией и крайне низкими содержаниями серебра в рудах. Проявление такой рудной зональности можно объяснить функционированием единой долгоживущей рудно-магматической системы.

Рудоподводящей структурой является Северо-Давендинский разлом. Рудные тела представлены сульфидно-кварцевыми жилами и зонами прожилково-вкрапленной минерализации. Сульфидно-кварцевые жилы имеют незначительную мощность (3–5 см). Они сопровождаются зонами серицитизации, калишпатизации, реже окварцевания мощностью от первых сантиметров до 1,5 м. Морфология рудных жил сложная.

Часто пережимы жил как по простиранию, так и по падению чередуются с раздувами мощностью до 4 м.

На месторождении выделяются несколько рудных зон: Центральная, Восточная, Северо-Восточная, Ивачиха, Вершина Ороченка, отличающиеся особенностями минерального состава. Основные промышленные запасы золота сосредоточены в Центральной рудной зоне, где рудные тела выполняют северо-западную систему трещин. Протяженность рудных тел по простиранию достигает 170 м. Кварцевые, кварц-карбонатные жилы содержат вкрапленность, иногда гнездовые и полосовидные скопления сульфидов, количество которых достигает 15 %, в среднем составляя 5 %. Сульфиды представлены, главным образом, пиритом, реже халькопиритом, в меньшей степени галенитом, сфалеритом (рис. 2). Мощность зоны окисления на месторождении незначительная. Граница перехода окисленных руд к первичным

сульфидным рудам оставляет около 10–20 м, увеличиваясь в зонах тектонических нарушений до 100 м.

По данным визуального изучения штуфов руд и стенок горных выработок, на Александровском месторождении отмечается следующая последовательность образования минеральных ассоциаций: 1) молибденит-кварцевая; 2) кварц-турмалиновая; 3) висмутин-кварцевая; 4) пирит-кварцевая с золотом (продуктивная); 5) золото-кварц-полиметаллическая (продуктивная); 6) кварц-карбонатная (табл.1). Наиболее распространенным рудным минералом является пирит, менее развиты халькопирит, висмутин, тетраэдрит, борнит. Малораспространенные минералы представлены сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, тетрадимитом, теллуровисмутином, золотом. К числу редких минералов относятся: самородное серебро, висмутин, пирротин, виттихенит, марказит, буланжерит, айкинит, гессит, магнетит, касситерит.

**Таблица 1.** Последовательность минералообразования и состав стадийных минеральных ассоциаций Александровского месторождения

**Table 1.** Sequence of mineral formation and composition of the staged mineral associations of the Alexandrovskoe gold deposit

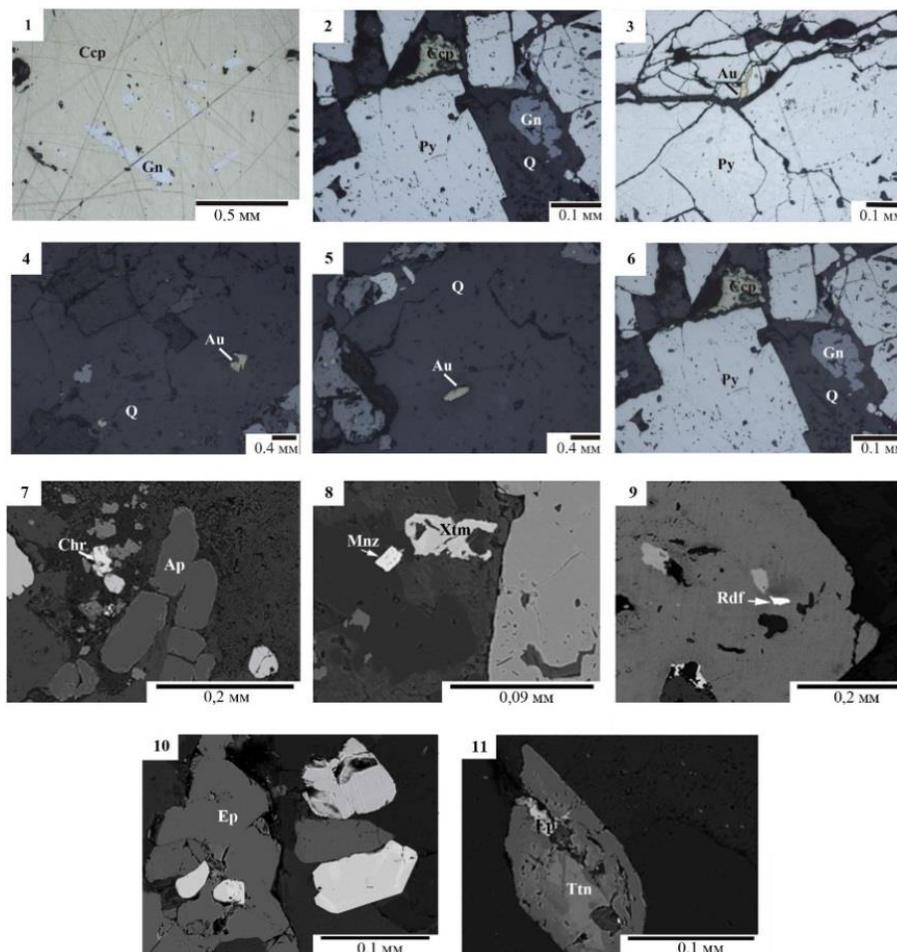
Стадия рудообразования Ore formation stage	Минералы руд/Ore minerals			
	Главный Main	Второстепенные Minor	Малораспространенные Less minor	Редкие Rare
Молибденит-кварцевая Molybdenite-quartz	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Молибденит Molybdenite	Висмутин Bismuthin	–
Кварц-турмалиновая Quartz-tourmaline	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Халькопирит Chalcopyrit	–	–
Висмутин-кварцевая Bismuthine quartz	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Висмутин Тетраэдрит Bismuthin Tetrahedrite	Магнетит Сульфовисмутит Халькопирит Молибденит Magnetite Sulfovismuthitis Chalcopyrite Molybdenite	Пирротин Марказит Ильменит Pyrrhotite Marcasite Ilmenite
Пирит-кварцевая (продуктивная) Pyrite-quartz (productive)	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Халькопирит Chalcopyrit	Галенит Арсенопирит Халькопирит Борнит Galenite Arsenopyrite Chalcopyrite Bornite	Золото Серебро Аргентит Айкинит Пирротин Марказит Native gold Native silver Argentite Akinitis Pyrrhotite Marcasite
Золото-кварц-полиметаллическая (продуктивная) Gold-quartz-polymetallic (productive)	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Халькопирит Сфалерит Chalcopyrit Sphalerite	Галенит Борнит Тетраэдрит Буланжерит Бурнонит Galena Bornite Tetrahedrite Boulangerite Bourmonite	Самородное золото Самородное серебро Халькозин Native gold Native silver Chalcocine
Пирит-кварц-карбонатная (РЗЭ) Pyrite-Quartz-Carbonate (REE)	Пирит Кварц Кальцит Pyrite Quartz Calcite	Халькопирит Флюорит Chalcopyrit Fluorite	–	Антимонит, Монацит Ксенотим, Апатит Рабдофан Черчит Antimonite Monazite Xenotim Apatite Rabdofan Churchite

Содержания сульфидов в рудах составляет 5–8 %. В рудах пирит-кварцевой, кварц-полиметаллической и кварц-карбонатной ассоциаций отмечается редкоземельная минерализация, представленная монацитом, ксенотимом, апатитом, рабдофаном и черчитом (рис. 2). Молибденит-кварцевая ассоциация на месторождении имеет незначительное распространение и представлена редкими прожилками мощностью до 1 см. Молибденит образует редкую неравномерную вкрапленность. Кварц-турмалиновая ассоциация проявлена слабо и развита преимущественно в Ивачихинской зоне. Характерными минералами этой ассоциации являются турмалин, пирит, халькопирит.

Халькопирит отмечается в небольшом количестве (до 1 %) в сростаниях с пиритом. Висмутин-кварцевая минеральная ассоциация присутствует главным образом в пределах Ивачихинской зоны. Минералы этой ассоциации образуют маломощные жилы и прожилки. Характерными рудными минералами Ви-Q ассоциации являются: пирит, висмутин, сульфовисмутит, молибденит. Пирит встречается в виде зерен неправильной формы, реже кубического габитуса и содер-

жит включения магнетита и халькопирита. Висмутин образует небольшие линзовидные скопления. Молибденит развит в виде изогнутых пластинок и ассоциирует с висмутином. По данным визуальных наблюдений в стенках горных выработок, висмутин-кварцевые жилы и прожилки сопровождаются серицитизацией, окварцеванием и калишпатизацией вмещающих пород.

Кварц-пиритовая ассоциация является наиболее распространенной на месторождении и сопряжена с интенсивной серицитизацией. В рудных жилах и прожилках данной ассоциации характерны повышенные содержания сульфидов и золота, а также широкий набор рудных минералов. Наиболее распространенным из них является пирит. Халькопирит встречается в виде мелких редких кристаллов в ассоциации с анкеритом. Основная масса золота наблюдается в ассоциации с пиритом, заполняя в нем микротрещины. Характерна также его ассоциация с халькопиритом, галенитом. Пробность золота изменяется от 850 до 970 ‰, в среднем составляя 929 ‰.



**Рис. 2.** Микрофотографии взаимоотношений минералов в рудах Александровского месторождения. Обозначения минералов: Gn – галенит, Py – пирит, Au – самородное золото, Q – кварц, Mnz – монацит, Chr – черчит, Ap – апатит, Xtm – ксенотим, Ep – энидот, Rdf – рабдофан, Tnt – титанит, Ccp – халькопирит

**Fig. 2.** Microphotographs showing the relationship of minerals in ores of the Aleksandrovskoe deposit. Mineral designations: Gn – galena, Py – pyrite, Au – native gold, Q – quartz, Mnz – monazite, Chr – grains, Ap – apatite, Xtm – xenotime, Ep – epidote, Rdf – rhabdophane, Tnt – titanite, Ccp – chalcopyrite

Золото-кварц-полиметаллическая ассоциация развита на флангах рудных жил. Наиболее распространенными рудными минералами этой ассоциации являются пирит, халькопирит, сфалерит, галенит. Менее распространены борнит, сульфосоли Pb и Cu, тетраэдрит, золото. Пирит образует вкрапленность в кварце. Халькопирит образует скопления, размером до 2 см, часто отмечается в виде эмульсионной вкрапленности в сфалерите и борните. Галенит отмечается в сростании со сфалеритом, а также заполняет микротрещины в пирите и халькопирите. Бурнит и буланжерит отмечаются в виде гнездообразных выделений в ассоциации с карбонатом. Золото отмечается в ассоциации с блеклой рудой, галенитом, сфалеритом. Изменения вблизи жильных образований выражены в карбонатизации и серицитизации.

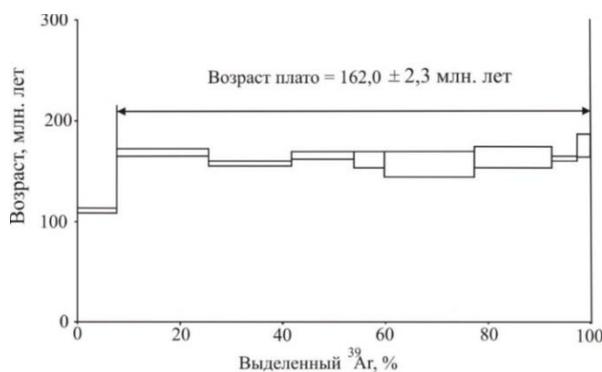


Рис. 3. Возраст серицитовых метасоматитов, установленный  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом

Fig. 3. Age of sericite metasomatites,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  method

Золото связано с пирит-кварцевой и золото-кварц-полиметаллической минеральными ассоциациями. Корреляционный анализ выявил тесную связь золота с Cu ( $r=0,99$ ) и Ag ( $r=0,78$ ). Метасоматические изменения, сопровождающие оруденение, представлены зонами серицитизации, калишпатизации, в меньшей степени – каолинизации и окварцевания. Возраст синрудного серицита, составляющий  $162 \pm 2,3$  млн лет (Ar/Ar метод), близок к возрасту интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса ( $J_{2-3}$ ) (рис. 3).

#### Петрогеохимическая характеристика пород и руд, время образования оруденения

Рассмотрим петрогеохимические характеристики интрузивных образований бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов, с которыми в Забайкалье связано формирование золотого и молибденового оруденения. Гранитоиды амуджикано-шахтаминского комплекса были опробованы восточнее (в 1,5 км) площади Александровского месторождения.

По коэффициенту глиноземистости гранитоиды бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов относятся к весьма высокоглиноземистым ( $al'=1,84-2,23$ ), дайки гранит-порфиров – высокоглиноземистым ( $al'=1,06-1,40$ ), дайки диоритовых порфиров – умеренно глиноземистым образованиям ( $al'=0,74-0,98$ ). Петрогеохимические особенности кислых интрузий бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов характеризуются высокими концентрациями калия ( $K_2O > 3\%$ ), низкой железистостью ( $FeO^*/FeO^*+MgO < 0,6$ ), соответствующей магнезиальным гранитоидам (рис. 4).

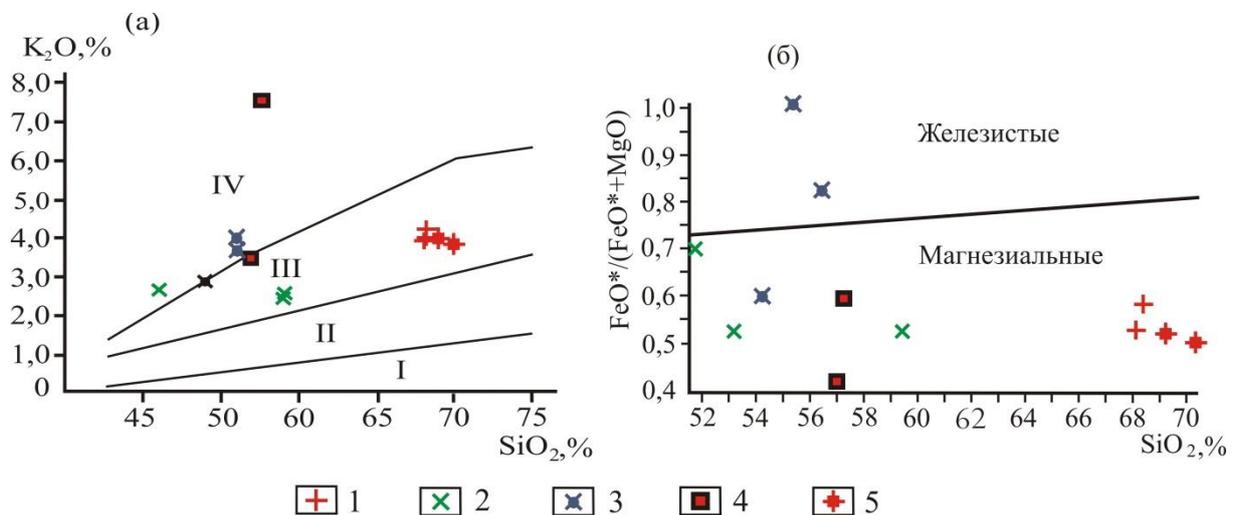


Рис. 4. Диаграммы  $K_2O-SiO_2$ (а),  $FeO^*/(FeO^*+MgO)-SiO_2$ (б) для интрузий Александровского месторождения. Бичурский комплекс ( $P_2$ ): 1 – гранитоиды, 2 – кварцевые диориты; Амуджикано-Шахтаминский комплекс (дайки): 3 – микродиориты, 4 – гранит-порфиры, 5 – гранитоиды. а) Поля интрузивных серий на диаграмме: IV – шошонитовая, III – высококальциевая известково-щелочная, II – среднекальциевая известково-щелочная, I – островодужная; б) Поля железистых и магнезиальных гранитоидов [11]

Fig. 4.  $K_2O-SiO_2$  (a) and  $FeO^*/(FeO^*+MgO)-SiO_2$  (б) diagrams for intrusive rocks of the Aleksandrovskoe deposit. Bichursky complex ( $P_2$ ): 1 – granitoids, 2 – quartz diorites; Amudzhikansky-Shakhtaminsky complex (dikes): 3 – microdiorites, 4 – granite-porphyr, 5 – granitoids. a) Fields of intrusive series in the diagram: IV – shoshonite, III – high-potassium calc-alkaline, II – medium-potassium calc-alkaline, I – island-arc; б) Fields of ferruginous and magnesian granitoids [11]

Их образование связано с магмами, характеризующимися большой окисленностью. Интрузии бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов характеризуются повышенными значениями магнезиальности пород, указывающими на глубинные источники их формирования. На диаграммах SrY–Y, (La/Yb)<sub>n</sub>–Yb<sub>n</sub> интрузивные образования бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов соответствуют адакитам (рис. 5).

Образование адакитов связано с процессами плавления субдуцировавшей океанической литосферы, деляминации континентальной коры [12, 13]. Установлено, что в Забайкальском крае порфировые граниты шахтаминского комплекса (J<sub>2-3</sub>), с которыми

связано молибденовое оруденение Шахтаминского месторождения, соответствуют К-адакитам [14]. С адакитами связано также крупное Быстринское Cu-Au-Fe месторождение [15]. Геохимические особенности адакитовых интрузий характеризуются следующими характеристиками: величина (La/Yb)<sub>n</sub> не более 10; содержание Yb – менее 1,8 г/т; Y<18,0 г/т; Sr>300 г/т [12]. Содержания микроэлементов гранитоидов бичурского и амуджикано-шахтаминского комплекса имеют незначительные различия. В сравнении с другими интрузиями дайки амуджикано-шахтаминского комплекса характеризуются повышенными концентрациями (г/т) – Rb (220–282), Cu (19–214), Zn (35–55) и Mo (1,2–8,8).

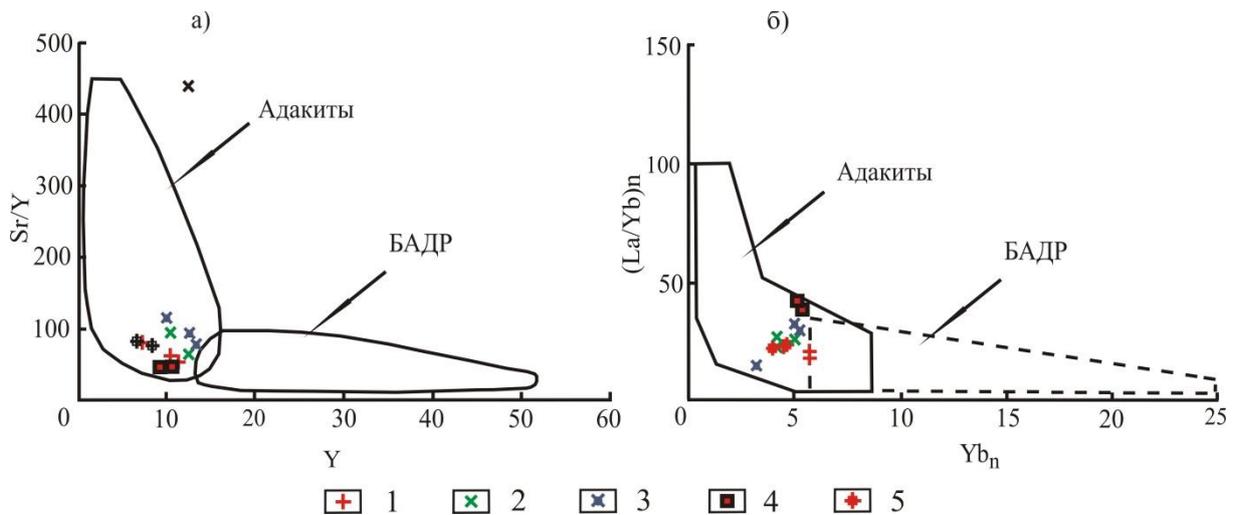


Рис. 5. Диаграммы Sr/Y–Y (а) и (La/Yb)<sub>n</sub>–Yb<sub>n</sub> (б) [2] для интрузивных образований Александровского месторождения. Условные обозначения – на рис. 4

Fig. 5. Sr/Y–Y (a) and (La/Yb)<sub>n</sub>–Yb<sub>n</sub> (b) diagrams [2] for the intrusive formations of the Aleksandrovskoe deposit. Conventional symbols as in Fig. 4

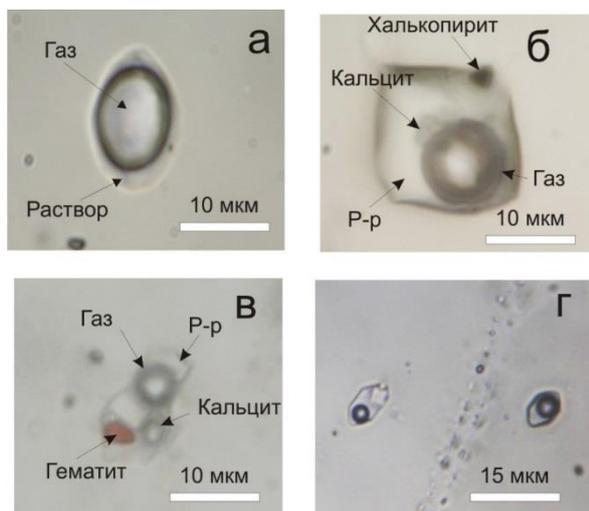


Рис. 6. Флюидные включения в кварце продуктивной минеральной ассоциации месторождения Александровское: газовое (а), двухфазное (б), многофазное с галитом и гематитом (в). Ассоциация трехфазных и двухфазных флюидных включений (г). Халькопирит и кальцит идентифицированы методом КР-спектроскопии. Водно-солевой раствор P–р

Fig. 6. Fluid inclusions in quartz of the productive mineral association of the Aleksandrovskoe deposit: vapor fluid inclusion (a), two-phase fluid inclusion (b), multi-phase fluid inclusion with halite and hematite (c). Association of multiphase and two-phase fluid inclusions (d). Chalcopyrite and calcite were identified by Raman spectroscopy. Water-salt solution P–р

#### Исследование флюидных включений в кварце рудных жил

Большинство флюидных включений в кварце продуктивных пирит-кварцевых жил Александровского месторождения являются псевдотворичными и вторичными. Вторичные флюидные включения в кварце трассируют микротрещины, либо располагаются по

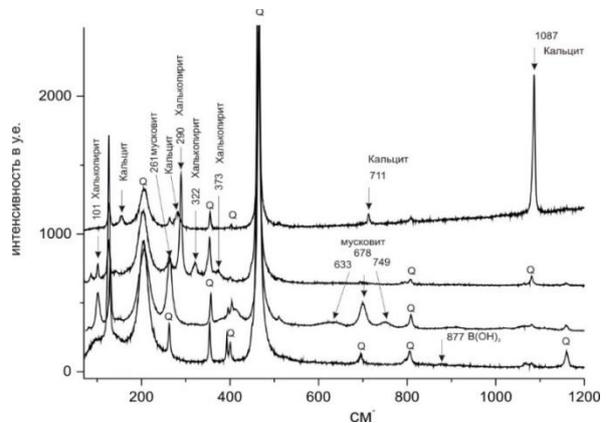
границам зерен кварца. Немногочисленные первичные флюидные включения располагаются обособлено от систем залеченных трещин, либо образуют «роевидные» скопления в кварце [16]. Флюидные включения по преобладающим фазам могут быть разделены на газовые, двухфазные и многофазные флюидные включения с галитом (рис. 6, а–в). Кроме преоблада-

ющих фаз, в составе включений присутствуют мелкие (1–3 мкм) прозрачные анизотропные и непрозрачные твердые фазы, среди которых визуальнo диагностируются красные чешуйки гематита. Наблюдается тесная пространственная ассоциация двухфазных и трехфазных флюидных включений, что предполагает происшедший синхронный захват во включения различных фракций гетерофазного флюида, типичного для процесса рудообразования на Cu-Mo порфировых месторождениях [17] (рис. 6, з). По данным КР-спектроскопии, состав газовой фазы флюидных включений представлен (в мольных %)  $\text{CO}_2$  98–88,3 и  $\text{N}_2$  11,7–2.

В составе растворов двух- и трехфазных флюидных включений методом КР-спектроскопии установлено присутствие  $\text{B}(\text{HO})_3$ , мелкие твердые фазы в которых представлены кальцитом, мусковитом и халькопиритом (рис. 7). По данным криометрии, установлены две генерации двухфазных включений, растворы которых различаются по температурам плавления эвтектики (табл. 2).

Двухфазные включения с низкой концентрацией солей от 8,9 до 2,6 мас. % в экв. NaCl в качестве главных солевых компонентов содержат  $\text{CaCl}_2$ , NaCl и гомогенизируются при 123–195 °С. Характерной особенностью растворов этих включений является присутствие примеси LiCl, которая существенно понижает температуру плавления эвтектики до –78 – –77 °С [18]. Двухфазные включения с более высокой температурой гомогенизации от 402 до 165 °С содержат растворы средней концентрации (19,4–6,5 мас. % в NaCl экв.), эвтектика которых плавится в интервале от –38 до –36 °С. Это позволяет предполагать присутствие в их составе, кроме преобладающего NaCl, примеси  $\text{FeCl}_3$  и  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . В жильном кварце двухфазные флюидные включения средней концентрации обычно ассоциируют с трехфазными флюидными включениями (рис. 6, з). Трехфазные включения (33,9–33 мас. % в экв. NaCl) содержат в качестве главной твердой фазы галит и характеризуются преобладанием NaCl в составе. Плавление эвтектики растворов происходит в интервале

температуры от –42 до –41 °С и указывает на примесь  $\text{FeCl}_3$  [18, 19]. Трехфазные включения гомогенизируются в интервале температур от 345 до 284 °С. Таким образом, формирование продуктивных пирит-кварцевых жил месторождения Александровское происходило в интервале температур от 356 до 123 °С, давление рудообразующих флюидов варьировало от 0,8 до 0,1 кбар [20]. Рудообразование происходило при участии гидротермальных флюидов высокой и средней концентрации, содержащих NaCl,  $\text{FeCl}_3$  и KCl, а также гомогенных низкоконцентрированных флюидов, содержащих преимущественно  $\text{CaCl}_2$ , NaCl и LiCl. Участие в рудообразовании гидротермальных флюидов, существенно различающихся по солевому составу и концентрации, может служить указанием на разные источники их генерации [21, 22].



**Рис. 7.** КР-спектры мелких твердых фаз, обнаруженных внутри флюидных включений (рис. 6). Q – спектральные линии кварца. Стрелками указаны характеристические спектральные полосы идентифицированных минералов и приведена их частота (в  $\text{cm}^{-1}$ ).

**Fig. 7.** Raman spectra of small solid phases detected inside fluid inclusions (Fig. 6). Q – spectral bands of quartz, arrows indicate the characteristic spectral bands of the identified minerals and their frequency (in  $\text{cm}^{-1}$ ).

**Таблица 2.** Результаты микротермометрического исследования флюидных включений в кварце рудных жил месторождения Александровское

**Table 2.** Results of microthermometric study of fluid inclusions in quartz of ore veins of the Aleksandrovskoe deposit

Образец Sample	Тип Type	$T_{\text{гом. газа}}/T_{\text{гв}}$	$T_{\text{эвт.}}/T_{\text{eu}}$	$T_{\text{пл. льда}}/T_{\text{mice}}$	$T_{\text{пл. NaCl}}/T_{\text{m NaCl}}$	Общая концентрация в мас. % экв. NaCl Salinity in NaCl eqv. wt. %
		°С				
237	A1	185–175	–49	–4	–	6,3
234	–	175–160	–77(–55...–49)	–1,6	–	2,5
235	–	158–123	–55...–49	–4,2	–	6,7
280	–	195–180	–78 (–55...–49)	–3,3...–1,6	–	4,8–2,6
232	A2	243–235	–37	–4	–	6,4
237	–	402–334	–38...–37	–15,6–4,6	–	19,4–7,3
246	–	260–220	–37	–15...–14	–	18,6
234	–	340–345	–38	–5,8	–	8,9
280	–	170–165	–37,5	–5,3...–6	–	7,8
280	–	280–237	–38	–15...–16	–	19,4
280	–	387–375	–36	–3,2	–	5,2
237	Б	348–340	–42	–	217–220	33,5–33
280	–	356–345	–42	–	237–210	33,9–33,5

Примечания: Тип – тип флюидного включения по фазовому составу;  $T_{\text{гом. газа}}$  – температура гомогенизации газовой фазы;  $T_{\text{эвт.}}$  – температура плавления эвтектики;  $T_{\text{пл. льда}}$  – температура плавления льда;  $T_{\text{пл. NaCl}}$  – температура плавления галита.

Notes: Type – the fluid inclusion type of by phase filling;  $T_{\text{гв}}$  – homogenization temperature of the gas phase;  $T_{\text{eu}}$  – melting temperature of the eutectic;  $T_{\text{m ice}}$  – melting temperature of ice;  $T_{\text{m NaCl}}$  – the melting temperature of halite.

**Изотопный состав O, S, распределение PЗЭ в кварце рудных жил и обсуждение полученных результатов**

Изучение показало, что в рудоносном кварце (кварц-пиритовая ассоциация)  $\delta^{18}\text{O}$  варьирует от +6,0 до +13,9 ‰. Изотопный состав кислорода гидротермального флюида рассчитан в системе кварц–вода по уравнению  $\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3,34 (10^6/T^2) - 3,31$ , где T – температура по Кельвину [23]. Рассчитанный изотопный состав  $\delta^{18}\text{O}$  во флюиде в равновесии с кварцем продуктивного этапа, при температуре минералообразования 340–400 °С, меняется от 0,42 до +9,84 ‰. Большинство значений попадает в интервал от +5,5 до +9,0 ‰, соответствующий флюиду магматической природы (табл. 3)

**Таблица 3.** Изотопный состав кислорода кварца и равновесного с ним флюида при формировании Александровского месторождения.

**Table 3.** Isotope composition of quartz oxygen of ore veins of the Aleksandrovskoe deposit and isotopic oxygen composition of the fluid, which was in equilibrium with vein quartz

№ пробы Sample No.	Изотопный состав кислорода Isotopic composition of oxygen		
	Кварц $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ SMOW Quartz $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ SMOW	$\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$ флюида $\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$ of the fluid*	
Александровское месторождение Aleksandrovskoe deposit Кварцево-сульфидные жилы Quartz-sulphide veins			
		290 °С*	420 °С*
224	7,7	0,48	4,06
227	13,0	5,78	10,26
230	13,9	6,68	10,26
244	12,7	5,48	9,06
278	11,5	4,29	7,86
279	9,4	2,19	5,76
280	11,5	4,29	7,86
280-1	10,4	3,19	6,76
Кварц-турмалин-сульфидные жилы Quartz-tourmaline-sulphide veins			
		320 °С	430 °С
256	10,4	4,21	6,96
262	6,0	-0,19	2,56

*Примечание:* \*Крайние значения интервала температуры гомогенизации флюидных включений в кварце.

*Note:* \*Extreme values of the homogenization temperature range of fluid inclusions in quartz.

Некоторая часть значений  $\delta^{18}\text{O}$  отвечает присутствию примеси метеорной воды (>6,0 ‰). Характерно, что рудоносный кварц с повышенными концентрациями золота образован в зоне вероятного смешения флюидов, соответствующих метеорным водам и магматическим флюидам (4,0–6,0 ‰). Так, рудоносный кварц с содержанием золота 82,0 и 881,0 г/т характеризуется значениями  $\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$  флюида 4,38–5,34 ‰ и 5,38–6,4 ‰ соответственно (табл. 3). Величины  $\delta^{34}\text{S}$  пирита из гидротермальных образований в целом изменяются от -1 до +0,9 ‰, в галените  $\delta^{34}\text{S}$  составля-

ет +0,9 ‰. Значения  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  во флюиде, находящемся в равновесии с сульфидами в момент минералообразования, были рассчитаны по уравнениям фракционирования [24]  $\Delta_{\text{пирит}}^{\text{H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = 0,4 (10^6/T^2)$ ,  $\Delta_{\text{галенит}}^{\text{H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{галенит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = -0,64 (10^6/T^2)$ , где T – температура по Кельвину. Значения  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  пирита во флюиде варьирует от -0,13 до -2,39 ‰, что соответствует флюиду магматической природы (табл. 4).

**Таблица 4.** Изотопный состав серы пирита и расчетный состав серы во флюиде Александровского месторождения

**Table 4.** Isotope composition of pyrite sulfur and the calculated isotope composition of sulfur in the ore-forming fluid, which was in equilibrium with the pyrite of the Aleksandrovskoe deposit

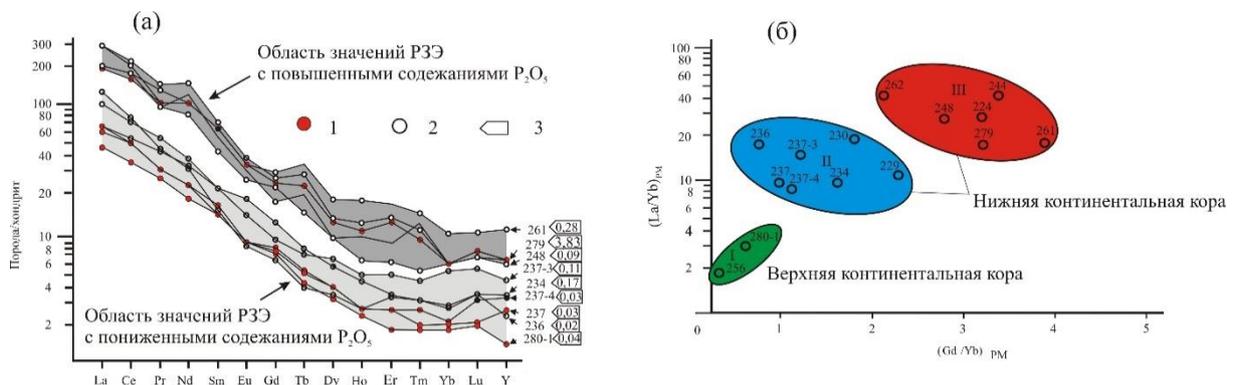
№ пробы Sample no.	$\delta^{34}\text{S}$ , ‰ CDT пирита $\delta^{34}\text{S}$ , ‰ CDT pyrite	Температура полной гомогенизации флюидных включений (°С) Total homogenization temperature of fluid inclusions (°C)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ во флюиде CDT $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ CDT in fluid
232	+1,2	243–235	-0,3 – -0,35
234	+0,9	340–350	-0,16 – -0,13
234	+2,4	340–350	+3,46 – +3,43
235	-0,6	158–123	+1,55 – +1,95
237	-1,3	402–334	+2,18 – -2,39
280	+0,3	387–345	+0,61 – -0,75

Распределение редкоземельных элементов (PЗЭ) показывает, что золотоносные сульфидно-кварцевые руды характеризуются разными значениями  $\sum\text{PЗЭ}$ ,  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ ,  $\text{Eu}/\text{Sm}$  и  $(\text{La}/\text{Yb})_n$ . Это указывает на их образование из разноглубинных, в разной степени дифференцированных магматических очагов (рис. 8). Разноглубинные рудоносные магматические источники характерны и для Любавинского месторождения. Источниками золотоносных руд были в основном глубинные, слабо дифференцированные магматические очаги [25]. На это указывает отсутствие (или слабое проявление) в рудах европейских аномалий ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* 0,79-1,09$ ). Часть рудоносных магматических очагов формировалось в верхней континентальной коре ( $\text{Eu}/\text{Sm} < 0,2$ ), другая часть в нижней континентальной коре ( $\text{Eu}/\text{Sm} > 0,2$ ) [26].

Распределение PЗЭ выявило тесную корреляцию суммы PЗЭ с повышенными концентрациями  $\text{P}_2\text{O}_5$  (рис. 8). При этом руды с повышенными содержаниями  $\text{P}_2\text{O}_5$  характеризуются в основном низкими концентрациями золота. Анализ флюидных включений рудоносного кварца указывают на то, что образование минералов редкоземельных элементов происходило при температурах 230–350 °С, что соответствуют среднетемпературному гидротермальному процессу. Известно, что отношения  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$  отражают глубину формирования магматических очагов [26]. На диаграмме  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}} - (\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$  выделяются три области значений с разными концентрациями PЗЭ, отражающие глубины функционирования магматических очагов (рис. 8, а). Условно назовем их «верхний», приуроченный к верхней континентальной коре, «средний» и «нижний» – к нижней континентальной коре. Распределение элементов показывает увеличе-

ние концентраций элементов мантийного профиля – Ti, Al, Mg, P, V, Cr, Sr, РЗЭ – от «верхнего» уровня к «нижнему». Установлено, что типоморфные отношения микроэлементов отражают обстановки [27]. Так, если значения U/Th отношения меньше 0,75, это указывает на окислительную среду рудообразования, 0,75–1,25 – на нейтральную, >1,25 – на восстановительную [28]. Co/Ni значения в рудах 0,55–2,34 свидетельствуют об определенной доле магматического компонента в составе рудообразующего флюида. В гидротермальных флюидах, содержащих хлор, отношения Hf/Sm, Nd/La и Th/La в рудах, преимуще-

ственно, меньше единицы, а во флюидах, обогащенных фтором, больше единицы [29]. Типоморфные отношения элементов в рудах Александровского месторождения указывают на то, что руды «нижнего» рудоносного уровня образовались в восстановительной обстановке, «среднего» и «верхнего» – в окислительной обстановке рудообразования. Значения отношения Co/Ni свидетельствуют об участии магматического флюида в рудообразовании. Hf/Sm, Nd/La и Th/La значения в рудах меньше единицы, что косвенно свидетельствует об обогащенности рудоносных флюидов хлором.



**Рис. 8.** Распределение редкоземельных элементов в рудах Александровского месторождения (а): 1 – пробы с содержанием Au > 1 г/т; 2 – пробы с содержанием Au < 1 г/т; 3 – номер пробы с содержанием P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в %. Диаграмма (La/Yb)–(Gd/Yb) для тех же проб (б)

**Fig. 8.** Distribution of rare-earth elements in the ores of the Aleksandrovskoe deposit (a): 1– samples with Au content > 1 g/t; 2 – samples with a content of Au < 1 g/t; 3 – sample number and the content of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in %. The (La/Yb)–(Gd/Yb) diagram for the same samples (b)

**Заключение**

Таким образом, золотое оруденение Александровского месторождения имеет магматический источник. Это подтверждается данными изотопного состава кислорода в рудоносном кварце и серы сульфидов. Ar/Ar методом установлено, что возраст синрудного серицита соответствует возрасту интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса, составляя 162±2,3 млн лет. По геохимическим особенностям эти интрузии соответствуют адакитам, что указывает на мантийные составляющие в их образовании. Они, вероятнее всего, и были источниками оруденения. Вариации изотопного состава кислорода рудоносных кварцев, изотопов серы сульфидов соответствуют флюиду магматической природы. Анализ выборки температур гомогенизации флюидных включений в кварце выявил средние значения – 150, 250 и 380 °С.

Пирит продуктивной ассоциации кристаллизовался в интервале температур 402–360 °С. Результаты изучения флюидных минералов в жильном кварце выявляют существенное различие солевого состава рудообразующих флюидов, что в свою очередь указывает на разные условия генерации и природу рудообразующих флюидов. Анализ распределения редких и РЗЭ указывает на то, что источниками оруденения были разноглубинные в разной степени дифференцированные магматические флюиды, функционировавшие как в верхней, так и в нижней континентальной коре.

*Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и ИПРЭК СО РАН (проект IX.137.1.2 № госрегистрации АААА-А17-117011210077-2, финансирующая организация Министерство науки и высшего образования Российской Федерации) и РФФИ (грант 16-05-00353).*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Смирнов С.С. Схема металлогении Восточного Забайкалья // Проблемы советской геологии. – 1936. – Вып. 6. – № 10. – С. 846–864.
2. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1990. – V. 54. – P. 1353–1357.
3. RRUFF. URL: <http://rruff.info/> (дата обращения 10.02.2020).
4. Вареник А.В. Информационный отчет о промежуточных результатах поисков и оценки на флангах Александровского

5. Дзидинский рудный район: строение, металлогения, геодинамика, перспективы развития / И.В. Гордиенко, Д.В. Гороховский, В.С. Ланцева, Р.А. Бадмацзыренова // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. – 2017. – Т. 40. – № 1. – С. 9–31.

6. Игнатович В.И. Минерально-сырьевая база молибдена // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 12. – С. 37–43.
7. Спиридонов А.М., Зорина Н.А., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академ. Изд-во «Гео», 2006. – 291 с.
8. Возраст гранодиорит-порфиров и березитов Дарасунского золоторудного поля (Восточное Забайкалье, Россия) / И.В. Чернышев, В.Ю. Прокофьев, Н.С. Бортников, А.В. Чучаев, Ю.В. Гольцман, В.А. Лебедев, Ю.О. Ларионова, Л.Д. Зорина // Геология рудных месторождений. – 2014. – Т. 56. – № 1. – С. 3–18.
9. Абрамов Б.Н. Ключевское золоторудное месторождение: условия формирования, петрогеохимические особенности пород и руд (Восточное Забайкалье) // Доклады Академии Наук. – 2015. – Т. 464. – № 1. – С. 85–90.
10. Закономерности размещения и условия формирования Au-содержащих Cu-Mo-порфировых месторождений Северо-Востока России / А.В. Волков, В.Н. Егоров, Е.Е. Колова, И.Ю. Прокофьев, Н.Е. Савва, А.А. Сидоров, В.С. Шаповалов // Геология рудных месторождений. – 2006. – № 6 (48). – С. 512–539.
11. A geo-chemical classification for granitic rocks / B.R. Frost, C.G. Barnes, W.J. Collins, R.J. Arculus, D.J. Ellis, C.D. Frost // Journal of Petrology. – 2001. – V. 42. – № 11. – P. 2033–2048.
12. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // Lithos. – 1999. – V. 46. – P. 411–429.
13. Ефремов С.В., Дриль С.И., Сандмирова Г.П. Образование гранитоидов с геохимической характеристикой в коллизионных орогенах на примере раннепалеозойских гранитоидов хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геохимия. – 2016. – № 7. – С. 633–640.
14. Шахтаминская Мо-порфировая рудно-магматическая система: возраст, источники, генетические особенности / А.П. Берзина, А.Н. Берзина, О.В. Гимон, З.Ш. Крымский, А.Н. Ларионов, И.В. Николаева, П.А. Серов // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 6. – С. 764–786.
15. Крупное Быстринское Cu-Au-Fe месторождение (Восточное Забайкалье) – первый пример в России ассоциированной с адakitитами скарново-порфировой рудообразующей системы / В.А. Коваленкер, С.С. Абрамов, Г.Д. Киселева, Т.Л. Крылова, Ю.И. Языкова, Н.С. Бортников // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 468. – № 5. – С. 547–552.
16. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Т. 1. Природа включений и методы их исследования / под ред. Л.С. Бородина. – М.: Мир, 1987. – 557 с.
17. Ulrich T., Günther D. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajodela Alumbraera, Argentina // Economic Geology. – 2001. – V. 96. – P. 1743–1774.
18. Борисенко А.С. Анализ солевого состава растворов газожидких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. – М.: Недра, 1982. – С. 37–47.
19. Боровиков А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С. Определение хлоридов железа (II, III) и цинка в растворах флюидных включений при криометрических исследованиях // Геохимия. – 2002. – № 1. – С. 70–79.
20. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions // Fluid Inclusions in Minerals. Methods and Applications / Eds. B. De Vivo, M.L. Frezzotti. – Bledsberg, VA: Virginia Tech. – P. 117–130.
21. Physicochemical models of formation of gold-silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) / T.V. Zhuravkova, G.A. Palyanova, K.V. Chudnenko, R.G. Kravtsova, I.R. Prokopyev, A.S. Makshakov, A.S. Borisenko // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 91. – P. 1–20.
22. Состав и металлоносность рудообразующих флюидов Мо-W(Be) месторождения Калгутинское (Горный Алтай) / А.А. Боровиков, В.А. Говердовский, А.С. Борисенко, Н.В. Брянский, С.И. Шабалин // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 4. – С. 647–662.
23. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1979. – V. 43. – P. 1131–1140.
24. Ohmoto H., Goldhaber M.B. Sulphur and carbon isotopes // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. – N.Y.: Wiley and Sons, 1997. – P. 517–612.
25. Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Посохов В.Ф. Любавинское золоторудное месторождение (Восточное Забайкалье): петрогеохимия, источники пород и руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 134–144.
26. Винокуров С.Ф. Европейские аномалии в рудных месторождениях и их геохимическое значение // Доклады Академии Наук. – 1996. – Т. 346. – С. 792–795.
27. Hofman A., Feigenson M.D., Raczek I. Case studies on the origin of basalt: III. Petrogenesis of the Mauna Ulu, Kilauea, 1969–1971 // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1984. – V. 88. – P. 24–35.
28. Jones B., Manning D.A.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones // Chemical Geology. – 1994. – V. 111. – P. 111–129.
29. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, Southeastern Guizhou Province, China / L. Kun, Y. Ruidong, C. Wenyong, L. Rui, T. Ping // Chinese Journal of Geochemistry. – 2014. – № 33. – P. 109–118.

Поступила 22.02.2020 г.

#### Информация об авторах

**Абрамов Б.Н.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

**Калинин Ю.А.**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; доцент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

**Боровиков А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

**Бадмацыренова Р.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт СО РАН.

**Посохов В.Ф.**, старший научный сотрудник, Геологический институт СО РАН.

UDC 550.42 (571.55)

## ALEXANDROVSKOE GOLD DEPOSIT (EASTERN TRANSBAIKALIA): SOURCES OF ROCK AND ORE SUBSTANCE

**Bair N. Abramov**<sup>1</sup>,  
b\_abramov@mail.ru

**Yury A. Kalinin**<sup>2,3</sup>,  
kalinin@igm.nsc.ru

**Andrey A. Borovikov**<sup>2</sup>,  
borovik@igm.nsc.ru

**Roza A. Badmatsyrenova**<sup>4</sup>,  
roza1977@mail.ru

**Viktor F. Posokhov**<sup>4</sup>,  
vitaf1@yandex.ru

<sup>1</sup> Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,  
PO Box 1032, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russia.

<sup>2</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>3</sup> Novosibirsk National Research State University,  
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>4</sup> Geological Institute SB RAS,  
6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russia.

**The relevance** of the study is in the need to expand the mineral resource base of Russia. Eastern Transbaikalia is one of the oldest gold mining regions of the country. Nevertheless, even in such a well-studied region, the issue of search and discovery of new ore deposits is acute. For the successful completion of such a task, the data are needed from a detailed study of already known ore deposits, which can be used to develop scientifically based criteria for search for ore deposits and mineralization forecast. Such data include determination of sources of ore-bearing magmatic melts, age and conditions for gold mineralization formation of the Alexandrovskoe gold deposit.

**The aim** of the study was to prove participation in formation of several magma chambers with different characteristics, using the results of studying the distribution of rare-earth elements in igneous rocks and ores, the isotopic composition of oxygen of ore-bearing quartz and sulfur sulfide, as well physicochemical conditions for formation of mineralization by studying fluid inclusions in minerals.

**Objects** of researches is igneous rocks and ores of the Alexandrovskoe gold deposit, located in the Eastern Transbaikalia.

**Methods.** To determine the elemental composition of the rocks, we used the X-ray fluorescence method and standard chemical analysis, the concentrations of rare-earth elements were measured using the method of sorption-atomic emission analysis with inductively coupled plasma (GIN SB RAS, Ulan-Ude). The study of isotopic composition of sulfur sulfides, Au and Ag contents, and isotopic age (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar) was carried out at the multicomponent and isotopic research center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk). Fluid inclusions in quartz of ore veins were studied by traditional methods of thermobarogeochemistry and Raman spectroscopy.

**Results.** The age (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar) of synrubic sericite ( $162 \pm 2,3$  Ma) was determined, which corresponds to the age of intrusions of the Amujikan-Shakhtaminsky complex. It was established that variations in isotopic composition of oxygen in ore-bearing quartz and isotopes of sulfur sulfides correspond to a fluid of magmatic nature. An analysis of distribution of rare and rare earth elements indicates that the sources of mineralization were deep-seated, differentially differentiated magma chambers that functioned both in the upper and lower continental crust. According to the study of fluid inclusions in quartz of ore veins, crystallization of mineral paragenesis of ore deposits occurred in the temperature range from 150 to 402 °C. A productive mineral association was formed at 402–360 °C. The paper indicated the participation of ore-forming fluids that differ in salt composition in ore formation. This indicates different conditions for generation and nature of ore-forming fluids. A distinctive feature of the deposit is ore formation due to various depth different degrees differentiated ore-bearing magmatic sources.

### **Key words:**

Transbaikalia, Aleksandrovskoe gold deposit, gold, REE, oxygen and sulfur isotopes, fluid inclusions.

*The work was carried out on state assignment of IGM SB RAS and IPREK SB RAS (project IX.137.1.2 state registration number AAAA-A17-117011210077-2, funding organization Ministry of Science and Higher Education of Russia Federation) and the Russian Federal Property Fund (grant 16-05-00353).*

## REFERENCES

- Smirnov S.S. Skhema metallogenii Vostochnogo Zabaykalya [The metallogeny scheme of Eastern Transbaikalia]. *Problemy sovetskoy geologii*, 1936, vol. 6, no. 10, pp. 846–864.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
- RRUFF. Available at: <http://truff.info/> (accessed 10 February 2020).
- Varenik A.V. *Informatsionnyy otchet o promezhutochnykh rezultatakh poiskov i otsenki na flangakh Aleksandrovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya za 2010–2013 gg.* ZAO «Rudnik Aleksandrovskiy» (FGU NPP «Rosgeofond», Zabaykalskiy filial FBU «TFGI po SFO, ZAO «Rudnik Aleksandrovskiy»), *Zabaykalskiy Kray, N-51-XXV* [Information report on the interim results of prospecting and assessment on the flanks of the Alexandrovsky gold ore deposit for 2010–2013. CJSC «Aleksandrov Mine» (Federal State Institution NPP «Rosgeofond», Trans-Baikal Branch of the Federal State Institution «TFGI in Siberian Federal District, CJSC «Aleksandrov Mine»), Trans-Baikal Territory, N-51-XXV] Davenda Village, 2014. 129 p.
- Gordienko I.V., Gorokhovskiy D.V., Lantseva V.S., Badmatyrenova R.A. The Dzida ore district: structure, metallogeny, geodynamics, development prospects. *Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits*, 2017, vol. 40, no. 1, pp. 9–31. In Rus.
- Ignatovich V.I. Mineral resources base of molybdenum. *Prospect and protection of mineral resources*, 2007, no. 12, pp. 37–43. In Rus.
- Spiridonov A.M., Zorina N.A., Kitayev N.A. *Zolotonosnye rudno-magmatische sistemy Zabaykalya* [Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. 291 p.
- Chernyshev I.V., Prokofev V.Y., Bortnikov N.S., Chugaev A.V., Goltsman Y.V., Lebedev V.A., Larionova Y.O., Zorina L.D. Age of granodiorite porphyry and beresite from the Darasun gold field, eastern Transbaikalia region, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2014, vol. 56, no. 1, pp. 1–14. In Rus.
- Abramov B.N. The Klyuchevskoe gold ore deposit (Eastern Transbaikalia): formation conditions and petrogeochemical features of rocks and ores. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 464, no. 1, pp. 85–90. In Rus.
- Volkov A.V., Sidorov A.A., Prokofev V.Yu., Savva N.E., Egorov V.N., Shapovalov V.S., Kolova E.E. Spatial distribution and formation conditions of Au-bearing porphyry Cu-Mo deposits in the Northeast of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48, no. 6, pp. 512–539. In Rus.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geo-chemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, no. 11, pp. 2033–2048.
- Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 411–429.
- Efremov S.V., Dril S.I., Sandimirova G.P. Formation of adakitic granitoids in the collisional orogens: evidence from the Early Paleozoic granitoids of the Munku-Sardyk Range, Eastern Sayan. *Geochemistry International*, 2016, vol. 54, no. 7, pp. 633–640. In Rus.
- Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O., Nikolaeva I.V., Krymskii R.S., Larionov A.N., Serov P.A. The Shaktama porphyry Mo ore-magmatic system (eastern Transbaikalia): age, sources, and genetic features. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 764–786. In Rus.
- Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D., Krylova T.L., Yazykova Y.I., Bortnikov N.S. The large Bystrinskoe Cu–Au–Fe deposit (Eastern Trans-Baikal Region): Russia's first example of a skarn–porphyry ore-forming system related to adakite. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, no. 5, pp. 547–552. In Rus.
- Redder E. *Flyuidnye vklucheniya v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. T. 1. Priroda vklucheniya i metody ikh issledovaniya [The nature of inclusions and methods of their research]. Moscow, Mir Publ., 1987. 557 p.
- Ulrich T., Günther D. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 2001, vol. 96, pp. 1743–1774.
- Borisenko A.S. Analiz solevogo sostava rastvorov gazovozhidkikh vklucheniya v mineralakh metodom kriometrii [Analysis of the salt composition of solutions of gas–liquid inclusions in minerals by the method of cryometry]. *Ispolzovanie metodov termobarogeokhimii pri poiskakh i izuchenii rudnykh mestorozhdeniy* [Use of methods of thermobarogeochemistry when searching for and studying ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1982. pp. 37–47.
- Borovikov A.A., Gushchina L.V., Borisenko A.S. Determination of iron (II, III) chlorides and zinc in solutions of fluid inclusions during cryometric studies. *Geochemistry International*, 2002, no. 1, pp. 70–79. In Rus.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O–NaCl fluid inclusions. *Fluid Inclusions in Minerals. Methods and Applications*. Blacksburg, VA, Virginia Tech, 1994. pp. 117–130.
- Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Prokofyev I.R., Makshakov A.S., Borisenko A.S. Physicochemical models of formation of gold–silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia). *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 1–20.
- Borovikov A.A., Borisenko A.S., Shabalin S.I., Goverdovskiy V.A., Bryanskiy N.V. Composition and metal contents of ore-forming fluids of the Kalguty Mo–W(Be) deposit (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 4, pp. 647–662.
- Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz–albite–anortite–water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, vol. 43, pp. 1131–1140.
- Ohmoto H., Goldhaber M.B. Sulphur and carbon isotopes. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons Publ., 1997. pp. 517–612.
- Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Posokhov V.F. Lyubavin gold deposit (Eastern Transbaikalia): petrogeochemistry, sources of rocks and ores. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 134–144. In Rus.
- Vinokurov S.F. Europium's anomalies in ore deposits and their geochemical significance. *Doklady Earth Sciences*, 1996, vol. 364, no. 6, pp. 792–795. In Rus.
- Hofman A., Feigenson M.D., Raczek I. Case studies on the origin of basalt: III. Petrogenesis of the Mauna Ulu, Kilauea, 1969–1971. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, vol. 88, no. 1–2, pp. 24–35.
- Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, no. 1–4, pp. 111–129.
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong C. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, Southeastern Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, vol. 32, no. 2, pp. 109–118.

Received: 20 February 2020.

## Information about the authors

**Bair N. Abramov**, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS.

**Yury A. Kalinin**, Dr. Sc., chief researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk National Research State University.

**Andrey A. Borovikov**, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Roza A. Badmatyrenova**, Cand. Sc., researcher, Geological Institute SB RAS.

**Viktor F. Posokhov**, senior researcher, Geological Institute SB RAS.

УДК 662.276.53(571.12)

## МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЮГРЫ

**Кузьменков Станислав Григорьевич<sup>1</sup>,**  
ksg.1948@ya.ru

**Аюпов Роман Шамильевич<sup>1</sup>,**  
ayupovrsh@gmail.com

**Новиков Максим Васильевич<sup>2</sup>,**  
NovikovMV@admhmao.ru

**Исаев Валерий Иванович<sup>3</sup>,**  
isaevvi@tpu.ru

**Лобова Галина Анатольевна<sup>3</sup>,**  
lobovaga@tpu.ru

**Стулов Пётр Александрович<sup>4</sup>,**  
StulovPA@nacrn.hmao.ru

**Бутин Виталий Сергеевич<sup>4</sup>,**  
butinvs@nacrn.hmao.ru

**Астапенко Елена Олеговна<sup>1</sup>,**  
fedorov-elena@yandex.ru

<sup>1</sup> Югорский государственный университет,  
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

<sup>2</sup> Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа–Югры,  
Россия, 628007, г. Ханты-Мансийск, ул. Студенческая, 2.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>4</sup> АУ «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана»,  
Россия, 628007, г. Ханты-Мансийск, ул. Студенческая, 2.

**Актуальность.** Государственным балансом запасов в Югре учтено 482 месторождения углеводородного сырья (порядка 12 млрд т извлекаемых запасов). 273 месторождения находятся в разработке, а 210 – на различных этапах исследования. Текущая выработанность месторождений составляет 61 %, а их текущая обводненность – выше 85 %. Современный этап характеризуется снижением добычи практически на всех объектах нефтедобычи и увеличением до 65–70 % доли трудноизвлекаемых запасов. Главной задачей предприятий ТЭК Югры – основной базы углеводородного сырья и нефтедобычи России – является стабилизация добычи нефти на достигнутом в 2018 г. уровне в 235–236 млн т/год. Решение этой задачи невозможно без применения инновационных технологий повышения нефтеотдачи пластов.

**Цель:** анализ эффективности (с точки зрения дополнительной добычи) внедренных в производственном режиме третичных технологий повышения коэффициента извлечения нефти на месторождениях Югры.

**Объект:** особенности методов увеличения нефтеотдачи и их геолого-промысловые результаты на месторождениях Югры (2013–2019 гг.): физико-химических, гидродинамических, гидроразрыва пласта, бурения горизонтальных скважин, зарезки боковых стволов, обработки призабойной зоны, а также прочих методов – геолого-технологических мероприятий по оптимизации работы фонда скважин.

**Методы:** ретроспективный сопоставительный анализ выполненных скважино-операций методов увеличения нефтеотдачи и дополнительной добычи нефти: физико-химических – 48016, гидродинамических – 23374, гидроразрыва пласта – 28454, бурения горизонтальных скважин – 11225, зарезки боковых стволов – 9010, обработки призабойной зоны – 44081, геолого-технологических мероприятий – 32123 операции.

**Результаты.** Анализировались геолого-промысловые и отчетно-статистические данные Научно-аналитического центра рационального недропользования им. В.И. Шпильмана и Департамента по недропользованию ХМАО-Югры. В Югре наметилась тенденция стабилизации годовой добычи нефти. При этом доля дополнительной добычи нефти за счет применения методов увеличения нефтеотдачи и геолого-технологических мероприятий увеличилась с 9,4 % в 2013 г. до 16,0 % в 2019 г. Наиболее массовыми методами интенсификации добычи и повышения нефтеотдачи являются физико-химические, обработки призабойной зоны и гидродинамические. Самыми эффективными методами, обеспечивающими дополнительную добычу, являются: бурение горизонтальных скважин, зарезка боковых стволов и гидроразрыв пласта. Массовое применение методов увеличения нефтеотдачи на разрабатываемых месторождениях требует усиления научно-технического обоснования оптимальных условий строительства и эксплуатации систем разработки. Доля трудноизвлекаемых запасов нефти составляет в среднем около 60 %, а по некоторым компаниям достигает 75–80 %, поэтому альтернативы развитию третичных методов повышения нефтеотдачи на месторождениях Югры сегодня нет.

### **Ключевые слова:**

Трудноизвлекаемые запасы, коэффициент извлечения нефти, методы увеличения нефтеотдачи, ретроспективный анализ, Югра.

### **Введение**

В августе 2019 г. в Ханты-Мансийске (Ханты-Мансийский автономный округ–Югра) под эгидой Минприроды РФ состоялось совещание [1], на кото-

ром во всех выступлениях было отмечено, что эпоха легкоизвлекаемой нефти подходит к концу.

В частности, министр Минприроды РФ Д.Н. Кобылкин отметил, что «на сегодня вопросы стимулирования внедрения нестандартных методов увеличе-

ния нефтедобычи в действующей системе налогообложения становятся весьма актуальными».

Губернатор Югры Н.В. Комарова предложила использовать Югру в качестве пилотного региона для апробации, внедрения, тиражирования новых технологий повышения нефтеотдачи. Главной целью Югра видит перед собой «становление в качестве поставщика технологий, химических реагентов и высококвалифицированных кадров, в т. ч. на мировые рынки», при этом у округа для этого «есть возможность выстроить современную систему работы» [1].

В то же время сегодня, помимо недостаточности эффективных технологических подходов разработки недр, остро встает вопрос обеспечения указанных технологий отечественным оборудованием и комплектующими. Их разработка, апробация конкретных технологий в условиях реальных полигонов и запуск в серийное производство позволят в дальнейшем осуществлять ввод в промышленный оборот не введенные в разработку, нерентабельные сегодня, мелкие месторождения и трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ), что актуально сегодня не только для Югры, но и для России в целом.

Государственным балансом запасов полезных ископаемых на 01.01.2019 в РФ учтено 3131 месторождение с суммарными технологически извлекаемыми запасами нефти порядка 30 млрд т, 74 % из которых приходится на Уральский федеральный округ (17 млрд т), в т. ч. 52 % (порядка 12 млрд т) сосредоточено в Югре.

По данным Государственной комиссии по запасам (ГКЗ) в России в разработку введено 45 % от всего открытого потенциала минерально-сырьевой базы РФ по нефти, остальные 55 % – не вовлечены в разработку из-за низкой экономической эффективности, отсутствия инфраструктуры и/или необходимых технологий добычи. При этом 80 % неразрабатываемых месторождений открыто более 10 лет назад, а 45 % – в конце прошлого века.

Аналогичная ситуация характерна и для Югры. Государственным балансом в Югре учтено 482 месторождения углеводородного сырья, в том числе: 419 нефтяных, 23 нефтегазоконденсатных, 18 газовых, 5 газоконденсатных, 17 газонефтяных. 273 месторождения находятся в разработке, а 210, или 44 % от общего количества открытых месторождений, – на различных этапах исследования. Следует отметить, что текущая выработанность месторождений составляет 61 %, а их текущая обводненность – выше 85 %.

Сегодня нефтегазовый сектор Югры находится в стадии стабилизации добычи нефти. Если в целом по РФ за 2018 г. добыча составила 555,8 млн т, что на 1,7 % больше добычи в 2017 г., то в Югре добыто 236 453,4 тыс. т нефти, или 42,5 % общероссийской добычи. В 2018 г., относительно 2017 г., добыча в округе увеличилась на 0,5 %, или на 1172,6 тыс. т в абсолютных единицах. На конец 2019 г. (ноябрь) накопленная добыча нефти на месторождениях Югры составила 11 876,4 млн т. *Весной 2020 г. в Югре ожидается добыча 12-ти миллиардной тонны нефти.*

По данным Департамента недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа–Югры (Депнедра Югры), извлекаемые запасы нефти распределенного фонда недр (РФН) Югры категории  $AB_1B_2+C_1C_2$  по состоянию на 01.01.2019 составляют 11,935 млрд т, из них доля нерентабельных для разработки в современных экономических условиях достигает более 3, 5 млрд т (рис. 1). При этом в подсчете не учитываются запасы нераспределенного фонда недр (НРФН) и не введенные в разработку в пределах РФН залежи и месторождения.



Рис. 1. Запасы нефти распределенного фонда недр Югры (Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа–Югры, 01.01.2019)

Fig. 1. Oil reserves of distributed subsurface resources of Yugra (Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra, 01.01.2019)

#### О наращивании ресурсной базы нефти и стабилизации добычи в Югре, о методах увеличения нефтеотдачи

Значительным резервом для развития отрасли и изменения отрицательного тренда добычи нефти остаются запасы уже эксплуатируемых месторождений, имеющих значительный потенциал остаточных запасов, а также запасы и ресурсы месторождений, открытых, но экономически нерентабельных для вовлечения в полномасштабную разработку в условиях действующей налоговой системы.

За 55 лет (1964–2019 гг.) разработок нефтегазовых месторождений в Югре выделяется *пять периодов* [2]: 1-й – (1964–1982 гг.) *растущей*, 2-й – (1983–1988 гг.) *стабильной*, 3-й – (1989–1996 гг.) *падающей*, 4-й – (1997–2007 гг.) *вновь возрастающей* добычи нефти и 5-й – (2008–настоящее время), характеризующийся *снижающейся добычей со стабилизацией в последние два года*. На рис. 2 представлена динамика добычи нефти, ввода новых скважин и объемов эксплуатационного бурения.

Высокому уровню добычи нефти в округе в свое время способствовало освоение и ввод в разработку крупных месторождений с высокопродуктивными залежами, а резкое снижение добычи в *третьем* периоде объясняется распадом СССР и сменой социально-экономической формации в России. Представляется, что и в этот сложный для страны период си-

бирские геологи и нефтяники с честью выполнили свой профессиональный долг, сохранив крупнейший в стране нефтегазовый комплекс, что позволило России с минимальными потерями преодолеть этот кризисный период. Современный этап разработки нефтегазоконденсатных месторождений Югры [3] характеризуется снижением добычи практически на всех объектах нефтедобычи и увеличением до 65–70 % на них доли ТРИЗ.

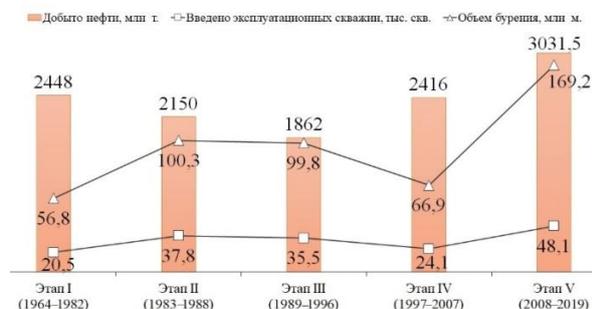


Рис. 2. Этапы разработки месторождений углеводородного сырья на территории Югры (по [2], с дополнениями)

Fig. 2. Stages of raw hydrocarbons fields development in the territory of Yugra (by [2], with additions)

Пути наращивания ресурсной базы нефти и стабилизации добычи в Югре связаны с несколькими направлениями, включая:

- 1) расширение географии поисково-оценочных работ в перспективных малоизученных районах (поисковых зон), открытие месторождений;
- 2) постановку обобщающих тематических исследований по детальной переобработке и переинтерпретации геолого-геофизической информации, направленных на выявление «пропущенных» залежей, причем это касается и территорий активной нефтедобычи;
- 3) создание опытных научных полигонов для внедрения технологий поиска, разведки, исследований, подсчета запасов залежей трудноизвлекаемой нефти, и, в первую очередь, баженовской свиты;
- 4) освоение ТРИЗ, в т. ч. залежей ачимовской, баженовской, абалакской, тюменской свит, тяжелой нефти сеномана;
- 5) увеличение коэффициента извлечения нефти (КИН) за счет масштабного применения методов увеличения нефтеотдачи (МУН) пласта и методов интенсификации притока жидкости на высоковыработанных и высокообводненных месторождениях.

Не станем останавливаться на первых четырех – эти направления были достаточно полно рассмотрены ранее в работах [3, 4], а остановимся на анализе эффективности и проблемах применяемых в Югре известных методов повышения КИН [5–7].

На сегодня главной задачей предприятий ТЭК Югры является стабилизация добычи нефти на достигнутом в 2018 г. уровне в 235–236 млн т/год. Решение этой задачи невозможно без применения современных технологий повышения нефтеотдачи пла-

стов. Значительным резервом для развития отрасли и изменения отрицательного тренда добычи нефти остаются запасы уже эксплуатируемых месторождений, имеющих значительный потенциал остаточных запасов, а также запасы и ресурсы месторождений открытых, но экономически нерентабельных в условиях действующей налоговой системы. Но без применения новых эффективных технологий повышения КИН задача вовлечения ТРИЗ в активную разработку затруднена [4].

Сегодня существует огромное число методов увеличения нефтеотдачи пластов и методов интенсификации добычи нефти, конечной целью которых является повышение коэффициента извлечения нефти. Как было отмечено выше, в Югре в 2020 г. ожидается добыча 12-ти миллиардной тонны нефти при текущем КИНе на уровне 0,37 [8]. При этом, по расчетам специалистов АУ «НАЦ РН им. В.И. Шпилемана», повышение КИН на 0,1 позволит дополнительно добыть более 4,0 млрд т нефти на уже разрабатываемых месторождениях Югры.

Таким образом, методы увеличения нефтеотдачи являются одним из перспективных направлений стабилизации добычи нефти, а широкомасштабное их внедрение на разрабатываемых месторождениях может дать «вторую жизнь» ТЭК Западной Сибири.

Учитывая значимость и актуальность поднятых на упомянутом выше совещании вопросов [1], нами был проведен анализ эффективности внедренных в производственном режиме новых технологий повышения КИН в Югре. В 2018 г. в результате применения МУН и интенсификации добычи дополнительно получено 35797,6 тыс. т нефти, что составляет 15,1 % от общего объема добытой в 2018 г. нефти в округе (рис. 3).

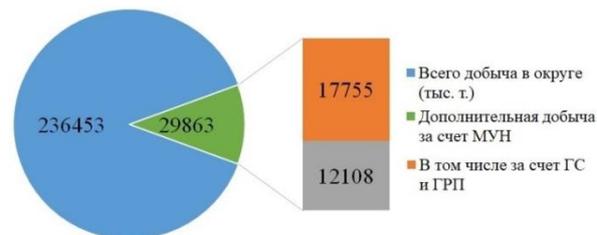
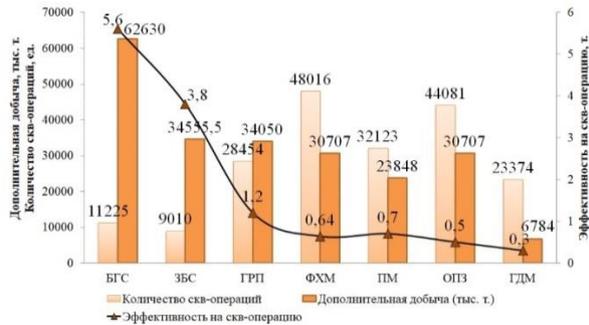


Рис. 3. Добыча нефти в Югре в 2018 г. Добыча за счет применения МУН, включая бурение горизонтальных скважин (ГС) и гидроразрыв пласта (ГРП)

Fig. 3. Oil production in Yugra in 2018. Production due to application of Enhanced Oil Recovery (EOR) methods including horizontal drilling (HD) and hydraulic fracturing (HF)

Сегодня большая часть месторождений Югры находится на третьей–четвертой стадиях разработки, когда традиционные методы добычи за счет естественной энергии пласта и регулирования пластового давления путем закачки в залежь воды (заводнение) и/или газа становятся неэффективными. Необходимым условием повышения КИН приобретают методы увеличения нефтеотдачи пластов. Ниже проведен анализ применения МУН за период с 2013 г. по настоящее время (рис. 4).



**Рис. 4** Дополнительная добыча нефти на разрабатываемых месторождениях Югры за счет применения МУН и интенсификации добычи (с 2013 по 2019 гг., данные за 2019 г. – ожидаемые)

**Fig. 4.** Additional oil production at producing fields of Yugra due to EOR methods application and intensification of production (since 2013 to 2019, data for 2019 – expected)

В целом эффективность добычи нефти даже с применением МУН следует считать неудовлетворительной, так как средняя нефтеотдача в Югре колеблется от 25 до 40–45 %. Поэтому сегодня на первый план выносятся задачи внедрения в производство современных технологий нефтедобычи, нацеленных на увеличение КИНа на разрабатываемых месторождениях, где традиционными методами извлечь остаточные запасы (55–75 % от начальных извлекаемых) нефти невозможно.

Среди МУН, направленных на увеличения КИНа, в Западной Сибири можно выделить тепловые, газовые, физико-химические (ФХМ), гидродинамические (ГДМ) методы, ГРП, бурение горизонтальных скважин (БГС), зарезку боковых стволов (ЗБС), обработку призабойной зоны (ОПЗ). В отдельный блок прочих методов (ПМ) интенсификации добычи следует отнести дострелы, перестрелы, возвраты на вышележащие пласты, приобщения пластов, изоляционные работы, интенсификацию добычи за счет снижения депрессии на пласт, а также работа с фондом скважин, оптимизацию и перевод работы скважин на механическую добычу.

Рассмотрим более подробно методы, применяемые в значимых объемах.

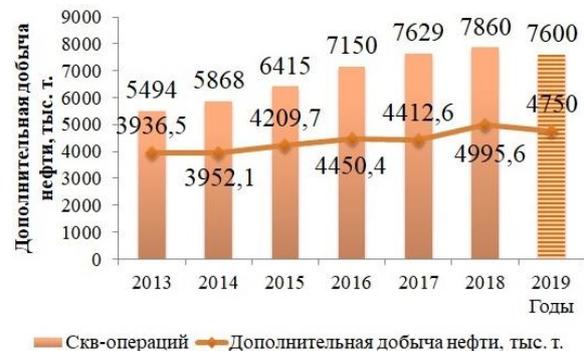
#### Физико-химические методы

Технологии ФХМ базируются на заводнении для регулирования (ограничения) и/или изоляции притока воды [5, 9]. ФХМ используются для дополнительной добычи нефти из пластов, которые характеризуются сильным истощением, обводненностью, а также из тех частей залежи, которые имеют рассеянную и нерегулярную нефтенасыщенность. Основным компонентом при применении методов является вода с примесью химических реагентов.

На сегодняшний день в практике применяется свыше 30 технологий повышения нефтеотдачи путем химического воздействия, но наиболее эффективным, по мнению специалистов – нефтяников, является трехфазное химическое заводнение – совместное

применение щелочи, водных растворов поверхностно активных веществ (ПАВ) и полимера. При этом щелочь способствует увеличению смачиваемости породы водой, ПАВ способствует снижению поверхностного натяжения нефти, а полимер – увеличению вязкости агента. В применяемой композиции основную «стабилизирующую» роль играет щелочь, которая многократно снижает оседание ПАВ на породе, а при реакции с нефтью в самом пласте создаются дополнительные ПАВ, что в конечном итоге существенно (в 5–10 раз) снижает расход ПАВ. Рост КИНа, по данным модельных испытаний, проведенных в различных исследовательских группах, варьирует от 15 до 25 %.

На рис. 5 представлен анализ проведения ФХМ на месторождениях Югры, из которого следует, что за семь лет было проведено более 48 тысяч скважино-операций (скв-операций). За счет этого добыто дополнительно 30707 тыс. т нефти.



**Рис. 5.** Динамика скважино-операций и дополнительной добычи нефти за счет применения физико-химических МУН на месторождениях Югры (с 2013 по 2019 гг., данные за 2019 г. – ожидаемые)

**Fig. 5.** Dynamics of well operations and additional oil production due to application of physical and chemical EOR methods at the fields of Yugra (since 2013 to 2019, data for 2019 – expected)

#### Гидродинамические методы

Сегодня в Югре заводнение является основным технологическим приемом разработки месторождений, однако его эффективность снижается из-за осложняющих добычу факторов, таких как вынос механических примесей, отложения парафинов, гидратов и др. Нефтяниками ТЭК Югры, наряду с традиционным заводнением, в массовом масштабе используются гидродинамические методы: форсированный отбор жидкости, увеличение и/или ограничение закачки воды. Самая востребованная технология ГДМ – метод циклического заводнения (ЦЗ) – характеризуется высокой эффективностью, дешевизной и незначительными технологическими усилиями для внедрения на промыслах.

На сегодня существует более 400 потокоотклоняющих технологий (ПОТ) [10–13], но в производственном режиме используется около ста. Проведенный ретроспективный анализ за период 2013–2019 гг. показал (рис. 6), что эффективность ГДМ значитель-

но ниже ожидаемой, особенно в осложненных геолого-физических условиях месторождений Западной Сибири, и требуют совершенствования. Эффективность ГДМ доказана в условиях фильтрационно-емкостной неоднородности коллектора, когда в объектах разработки (пластах) показатели проницаемости разнятся в разы и более.



**Рис. 6.** Динамика применения гидродинамических МУН и дополнительной добычи нефти на месторождениях Югры (с 2013 по 2019 гг., данные за 2019 г. – ожидаемые)

**Fig. 6.** Dynamics of application of hydrodynamic EOR methods and additional oil production at the fields of Yugra (since 2013 to 2019, data for 2019 – expected)

Реально доказанный эффект при заводнении получен от применения потококотклоняющих составов, главной особенностью которых является перераспределение потоков нагнетаемой жидкости из более в менее проницаемые зоны. При этом широкое применение получили эмульсионные, термотропные, осадко-гелеобразующие и гелеобразующие на основе полиакриамида (ПАА) потококотклоняющие технологии. Эффективность ПАА очень высокая, от 1000 до 5000 т дополнительной нефти на 1 т сухого полимера.

Отметим, что ПОТ имеют ряд серьезных ограничений по физическим параметрам пласта-коллектора и, в первую очередь, по температурному диапазону пласта (ограничения до 60 °С), а также по «чувствительности» к составу воды, на основе которой проводится приготовление закачиваемого в пласт состава [14]. Основным косвенным признаком успешности применения ПОТ следует считать уменьшение обводненности получаемой продукции и изменение профиля приемистости нагнетательных скважин.

#### Обработка призабойной зоны пласта

В особую категорию МУН пластов следует отнести обработку призабойной зоны пласта [6, 7, 15]. В ТЭК Югры нашли промышленное применение химические, механические, тепловые, физические и вибрационные методы ОПЗ и их комбинации (термокислотная, пенокислотная и другие комбинации).

Наиболее часто используемым видом ОПЗ скважины на месторождениях Югры является кислотная

обработка (КО) и ее модификации. Отметим, что область применения соляно-кислотной обработки (СКО) – это преимущественно карбонатные коллекторы, а область применения глино-кислотных обработок (ГКО) – терригенные коллекторы.

В промышленных масштабах на месторождениях округа применяются кислотные ванны, СКО под давлением, глинокислотная, пенокислотная и термокислотная обработки, также обработка нефтекислотными и другими, композиционными из нескольких кислот (серной, соляной, уксусной, лимонной, плавиковой, молочной и др.), эмульсиями.

На рис. 7 представлен анализ применения ОПЗ на месторождениях Югры, из которого следует, что за семилетний период на месторождениях Югры было проведено 44081 скважино-операций с эффективностью 0,5 тыс. т/скв-опер. За счет применения ОПЗ дополнительная добыча нефти составила 20172 тыс. т.



**Рис. 7.** Дополнительная добыча нефти за счет обработки призабойной зоны на месторождениях Югры (с 2013 по 2019 гг., данные за 2019 г. – ожидаемые)

**Fig. 7.** Additional oil production due to bottomhole treatment at the fields of Yugra (since 2013 to 2019, data for 2019 – expected)

#### Гидроразрыв пласта

Конечной целью применения ГРП является увеличение продуктивности нефтяных и приемистости нагнетательных скважин, вовлечения в разработку ТрИЗ, увеличение темпов отбора нефти и повышение КИН [16–18]

С конца пятидесятых годов прошлого века количество ГРП, проведенных на месторождениях СССР, превышало 1500 операций в год, однако после открытия «легкой» западно-сибирской нефти, добыча которой происходила без дополнительных методов стимулирования пласта, ГРП потеряла свою популярность. В Западной Сибири, в связи с изменением структуры запасов в сторону увеличения залежей с ТрИЗ, технологию ГРП начали внедрять в конце восьмидесятых годов прошлого века, а на сегодня она является самой массовой при добыче нефти в регионе. Отметим, что и сегодня на месторождениях Югры для проведения ГРП используется зарубежное оборудование и технологии. Поэтому главной целью нефтяников России на данный момент является не только повышение эффективности технологии и её

удешевление, но и переход на отечественные технологии.

На сегодня (рис. 8) в производственном масштабе на предприятиях ТЭК Югры [18] применяется как стандартный ГРП, так и инновационные его варианты (сложнопрофильные, большеобъемные и многостадийные ГРП, ГРП в горизонтальных скважинах и др.) в достаточно больших объемах, в том числе и на вновь вводимых скважинах с ТриЗ.



**Рис. 8.** Эффективность применения ГРП на месторождениях Югры (с 2013 по 2019 гг., данные за 2019 г. – ожидаемые)

**Fig. 8.** Efficiency of hydraulic fracturing application at the fields of Yugra (since 2013 to 2019, data for 2019 – expected)

#### Бурение горизонтальных скважин

Анализ применения методов увеличения КИН показывает, что наиболее рациональным в настоящее время в Югре становится бурение горизонтальных скважин. Это связано как с необходимостью повышения производительности и снижения сроков окупаемости строительства скважин, так и с тем, что добыча нефти из ТриЗ в вертикальных стволах в современных экономических условиях неэффективна. Как показывает теория и практика, добыча нефти из горизонтальной скважины, большая часть которой проходит внутри коллектора, значительно повышает дебиты по нефти [19–21].

В результате моделирования и проверки в производственном режиме установлено [18], что оптимальная длина горизонтального участка ствола добывающей скважины для месторождений Среднего Приобья составляет 750 м. Среди основных преимуществ добычи из ГС можно выделить:

- 1) добыча из горизонтальных скважин нужна там, где по объективным причинам невозможно проводить бурение нефтяных скважин (водоохранные, санитарно-защитные зоны и объекты инфраструктуры);
- 2) «нагрузка» на единицу площади коллектора, связанная с добычей, значительно меньше, чем у вертикальной;
- 3) уменьшается образование конусов и «языков» обводнения;

- 4) вследствие расширения объема дренирования пласта-коллектора к выработке приобщаются слабодренируемые зоны и пропластки, происходит увеличение коэффициента охвата пласта воздействием.

В настоящее время потенциал ГС при разработке нефтяных месторождений используется не полностью [22]. Эффективность разработки залежей с применением ГС возможна только в случае учета всей имеющейся геолого-геофизической информации для каждого конкретного месторождения и/или его блока. Для повышения эффективности выработки запасов нефти с использованием ГС основной задачей является дальнейший поиск оптимальных схем расположения стволов горизонтальных скважин. А это невозможно без создания постоянно действующей гидродинамической модели месторождения (залежи, пласта).

Анализ применения технологии добычи нефти из ГС на месторождениях Югры за период с 2013 по 2019 г. (рис. 9) позволил нам сделать вывод о том, что наряду с положительными результатами, указанными выше, имеются и неудачные.



**Рис. 9.** Эффективность добычи нефти из горизонтальных скважин на месторождениях Югры (с 2013 по 2019 гг., данные за 2019 г. – ожидаемые)

**Fig. 9.** Efficiency of oil production from horizontal wells at the fields of Yugra (since 2013 to 2019, data for 2019 – expected)

Среди факторов, снижающих эффективность работы ГС, можно выделить:

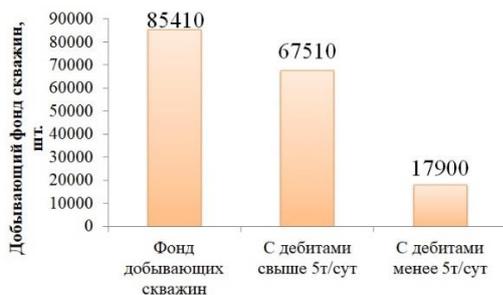
- 1) концентрацию взвешенных частиц в нижней части ствола ГС;
- 2) кольматацию призабойной зоны скважины продуктами фильтрационного разрушения и диспергирование её глинистыми частицами потоком добываемой жидкости;
- 3) заиливание щелевого фильтра;
- 4) механическую деформацию ствола ГС.

#### Зарезка боковых стволов

Современные технологии направленного бурения позволяют оптимально использовать имеющийся, включая простаивающий, фонд скважин. Наиболее эффективным на сегодня методом восстановления

бездействующих и повышения производительности малодебитных скважин является бурение бокового ствола [23 и др.]. Этот метод позволяет производить работы по строительству скважины точно по требуемому направлению, с любой глубины, при любых углах наклона. Особенно актуальной технология зарезки боковых стволов (ЗБС) становится при эксплуатации месторождений на поздней стадии разработки, когда строительство новых скважин становится нерентабельным в связи с их низкодебитностью.

Максимальный экономический эффект при использовании ЗБС можно получить при бурении многоствольных и разветвленно-горизонтальных скважин, что позволяет вовлечь в эксплуатацию простаивающий фонд нефтяных скважин, в которых остаточные запасы нефти в зоне их дренирования достаточно велики и которые нельзя вернуть в действующий фонд другими методами. Это характерно и для Югры, где даже на вновь вводимых в разработку месторождениях в последние годы наблюдается снижение эффективности эксплуатационного бурения и увеличение неработающего фонда скважин (рис. 10).



**Рис. 10.** Фонд добывающих скважин на месторождениях Югры (Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа–Югры, 01.01.2019)

**Fig. 10.** Producing well stock at the fields of Yugra (Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra, 01.01.2019)

Из рис. 10 следует, что на 01.01.2019 г. фонд низкодебитных (читай – нерентабельных) добывающих скважин составлял почти 18 тыс., или 21 % от всего работающего фонда скважин. При этом фонд неработающих (простаивающих) скважин с дебитами менее 5 т/сут составил 8,5 % от общего фонда добывающих скважин, или более 7 тыс. скважин.

Что касается дебитов по нефти вновь вводимых в разработку скважин, то за 10 лет дебит снизился с 41 т/сут в 2008 г. до 28 т/сут в 2018 г., или на 32 %.

На рис. 11 представлена динамика объемов проведения ЗБС за семь лет. Отметим, что за этот период дополнительная добыча возросла с 4452 до 5500 т в год, т. е. на 24 %. Работы с применением технологии ЗБС в настоящее время дают максимальный рост эффективности. Это не скажешь о рассмотренных выше технологиях ГРП (рис. 8), где показатель дополнительной добычи за рассматриваемый период остался практически на уровне 2013 г.



**Рис. 11.** Динамика объемов проведения зарезки боковых стволов (ЗБС) и дополнительной добычи на месторождениях Югры (с 2013 по 2019 гг., данные за 2019 г. – ожидаемые)

**Fig. 11.** Dynamics of scope of Sidetracking (ST) performance and additional production at the fields of Yugra (since 2013 to 2019, data for 2019 – expected)

#### Другие методы интенсификации добычи нефти

Значительный объем работ при добыче нефти включают в себя геолого-технологические мероприятия (ГТМ) по оптимизации работы фонда скважин, в том числе дострелы, перестрелы, возвраты на вышележащие пласты, приобщения пластов, изоляционные работы, интенсификация добычи за счет снижения депрессии на пласт, а также перевод работы скважин на механическую добычу. Выше эти мероприятия были названы прочими методами – ПМ.

В каждой нефтяной компании на территории Югры названные технологии различны и зависят, прежде всего, от состояния фонда скважин того или иного объекта разработки. Общими причинами для проведения этих работ являются: полное истощение продуктивного пласта, прорыв контурных вод и практически 100 % обводнение разрабатываемого объекта, дегазация продуктивного горизонта, а также многочисленные осложнения, связанные с добычей нефти. На рис. 12 представлена динамика объемов ГТМ за семилетний период.



**Рис. 12.** Динамика дополнительной добычи нефти за счет ГТМ по оптимизации работы фонда скважин на месторождениях Югры (с 2013 по 2019 гг., данные за 2019 г. – ожидаемые)

**Fig. 12.** Dynamics of additional oil production due to Well Interventions Operations (WIO) for optimization of well stock work at the fields of Yugra (since 2013 to 2019, data for 2019 – expected)

### Заключение

В Ханты-Мансийском автономном округе–Югре наметилась положительная тенденция стабилизации годовой добычи нефти на уровне 235–236 млн т. При этом доля дополнительной добычи нефти за счет применения методов увеличения нефтеотдачи и интенсификации добычи увеличилась с 9,4 % в 2013 г. до 16,0 % в 2019 г.

Наиболее массовыми среди используемых в промышленных масштабах методами интенсификации добычи и повышения нефтеотдачи являются физико-химические – ФХМ, обработки призабойной зоны – ОПЗ и гидродинамические – ГДМ. А самыми эффективными методами, с точки зрения дополнительной добычи, являются бурение горизонтальных скважин – БГС, резка боковых стволов – ЗБС и гидроразрыв пласта – ГРП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новостная лента ИА Neftegaz.ru от 28 августа 2019 г. URL: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/483197-yugra-mozhet-stat-pilotnym-regionom-dlya-aprobatsii-novykh-tehnologiy-povysheniya-nefteotdachi/> (обращение 02.12.2019).
2. Оценка добычного потенциала нефтяных месторождений ХМАО – Югры в современных условиях / И.П. Толстолыткин, Н.В. Мухарлямова, Т.Н. Печерин, М.В. Стрельченко // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Двадцать вторая научно-практическая конференция. Т. 1. – Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2019. – С. 15–23.
3. Развитие нефтегазового комплекса Югры, трудноизвлекаемые запасы / С.Г. Кузьменков, В.И. Исаев, В.И. Булатов, Р.Ш. Аюпов, Н.О. Игенбаева, Ю.А. Кузьмин, П.А. Стулов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 103–113.
4. Идентификация трудноизвлекаемых запасов нефти Югры / С.Г. Кузьменков, Ю.А. Кузьмин, П.А. Стулов, Р.Ш. Аюпов, В.И. Булатов, Н.О. Игенбаева, В.И. Исаев, Г.А. Лобова // Геофизический журнал. – 2018. – Т. 41. – № 4. – С. 114–124.
5. Сургучев Л.М. Обзор третиных методов увеличения нефтеотдачи // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 5. – С. 50–54.
6. Romero-Zeron L. Chemical Enhanced Oil Recovery (сEOR). Practical Overview. – Fredericton: IntechOpen, 2016. – 200 p.
7. Hascakir B. Introduction to thermal Enhanced Oil Recovery (EOR) // Journal of Petroleum Science and Engineering, special issue. – 2017. – V. 154. – P. 438–441.
8. Сопоставление выработки запасов нефти основными нефтепользователями ХМАО–Югры / А.В. Оренбуркин, Н.Ю. Галкин, Н.Д. Марьяина, Н.В. Козельская // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Двадцать вторая научно-практическая конференция. Т. 2. – Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2019. – С. 44–52.
9. Application of Foam for Gas and Water Shut-off: Review of Field Experience / S.A. Zhdanov, A.V. Miyan, L.M. Surguchev, L.M. Castanier, J.E. Hanssen // European Petroleum Congress. – Milan, Italy: Society of Petroleum Engineers, 1996. – P. 377–388.
10. Владимиров И.В. Нестационарные технологии нефтедобычи (этапы развития, современное состояние и перспективы). – М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2004. – 216 с.
11. Standnes D.C., Skjevrak I. Literature review of implemented polymer field projects // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2014. – V. 122. – P. 761–775.
12. Delamaide E. Comparison of steam and polymer injection for the recovery of heavy oil // SPE Western Regional Meeting. – Bakersfield, California, USA, 2017. – Paper SPE 185728.

Массовое внедрение мероприятий по интенсификации добычи нефти на разрабатываемых месторождениях является наиболее актуальной проблемой и требует усиления научного обоснования оптимальных условий строительства и эксплуатации систем разработки.

Для стимулирования геологоразведки и увеличения добычи нефти, включая ТРИЗ, за счет внедрения в производство технологий и технических приемов интенсификации необходимо совершенствование нормативно-правового обеспечения нефтепользования [4].

Учитывая, что доля ТРИЗ нефти в Югре составляет в среднем около 60 %, а по некоторым компаниям достигает 75–80 %, альтернативы развитию третиных методов (ГС, ЗБС, ГРП, ФХМ, ОПЗ, ГДМ) на месторождениях Югры сегодня просто нет.

13. Emulsification and improved oil recovery with viscosity reducer during steam injection process for heavy oil / Zhengbin Wu, Liu Huiqing, Xue Wang, Zequan Zhang // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2018. – V. 61. – P. 348–355.
14. Опыт применения потокоотклоняющих технологий повышения нефтеотдачи пластов с использованием реагента «Продукт № 1» на основе титанового коагулянта / В.В. Халин, Р.Ф. Мазитов, Е.Н. Мальшаков, В.Ю. Хорюшин, Н.А. Демяненко // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Двадцать вторая научно-практическая конференция. Т. 2. – Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2019. – С. 53–66.
15. Закиров С.Н., Закиров И.С. Новый подход к разработке нефтегазовых залежей. – М.: Изд-во «ИРЦ Газпром», 1996. – 51 с.
16. Economides M., Oligney R., Valkó P. Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice. – Alvin, Texas: Orsa Press, 2002. – 25 p.
17. Fracability evaluation in shale reservoirs – an integrated petrophysics and geomechanics approach / X. Jin, S.N. Shah, J. Roegiers, B. Zang // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. – Woodlands, TX, USA, 2014. – Paper SPE 168589.
18. Черевко М.А., Янин А.Н., Янин К.Е. Разработка нефтяных месторождений Западной Сибири горизонтальными скважинами с многостадийными гидроразрывами пласта. – Тюмень; Курган: Зауралье, 2015. – 268 с.
19. Саунин В.И., Шаламов М.А., Ягафаров А.К. Эффективность строительства и эксплуатации горизонтальных скважин на Самотлорском месторождении (пласт АВ 1/1-2 «рябчик») // Нефтепромысловое дело. – 2007. – № 11. – С. 59–62.
20. Akangbou H.N., Burby M. Nasr Gh. Effectively optimizing production of horizontal wells in homogeneous oil reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 150. – P. 128–136.
21. Near-wellbore modeling of a horizontal well with Computational Fluid Dynamics / M.L. Szanyi, C.S. Hemmingsen, Wei Yan, J.H. Walther, S.L. Glimberg // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 160. – P. 119–128.
22. Закиров И.С., Владимиров И.В. Соотношение числа горизонтальных и вертикальных скважин при определении плотности сетки скважин // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 1. – С. 66–67.
23. Методика проектирования боковых стволов скважин на месторождениях Западной Сибири с учетом поздней стадии их разработки / Р.Р. Исхаков, С.А. Воронов, А.И. Ермолаев, В.В. Воронова // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 1. – С. 38–41.

Поступила 2.02.2020 г.

#### **Информация об авторах**

**Кузьменков С.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

**Аюпов Р.Ш.**, кандидат технических наук, доцент Института нефти и газа Югорского государственного университета.

**Новиков М.В.**, заместитель директора Департамента недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа–Югры.

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

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

**Стулов П.А.**, первый заместитель директора АУ «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана».

**Бутин В.С.**, заведующий лабораторией отделения мониторинга разработки нефтяных месторождений АУ «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана».

**Астапенко Е.О.**, кандидат экономических наук, доцент Института цифровой экономики Югорского государственного университета.

УДК 662.276.53(571.12)

## ENHANCED OIL RECOVERY METHODS AT FIELDS OF YUGRA

**Stanislav G. Kuzmenkov<sup>1</sup>,**  
ksg.1948@ya.ru

**Roman Sh. Ayupov<sup>1</sup>,**  
ayupovrsh@gmail.com

**Maksim V. Novikov<sup>2</sup>,**  
NovikovMV@admhmao.ru

**Valery I. Isaev<sup>3</sup>,**  
isaevvi@tpu.ru

**Galina A. Lobova<sup>3</sup>,**  
lobovaga@tpu.ru

**Petr A. Stulov<sup>4</sup>,**  
StulovPA@nacrn.hmao.ru

**Vitaliy S. Butin<sup>4</sup>,**  
butinvs@nacrn.hmao.ru

**Elena O. Astapenko<sup>1</sup>,**  
fedorov-elena@yandex.ru

<sup>1</sup> Yugra State University,  
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

<sup>2</sup> Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra,  
2, Studencheskaya street, Khanty-Mansiysk, 628007, Russia.

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

<sup>4</sup> Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman,  
2, Studencheskaya street, Khanty-Mansiysk, 628007, Russia.

**The relevance.** State Register of Reserves booked 482 fields of raw hydrocarbons (in the order of 12 billion tonnes of recoverable reserves) in Yugra. 273 fields are at production stage, 210 fields are at different stages of research. Current depletion of producing fields is 61 % and their current water cut is above 85 %. Modern stage is characterized by decreasing production rate virtually at all objects of oil recovery and increasing of hard to recover reserves component to 65–70 %. The main task for fuel and energy manufacturers of Yugra – the major base of raw hydrocarbon materials and recovery in Russia – is to stabilize oil production on the reached in 2018 level at 235–236 million tonnes per year. Solving of this problem is impossible without application of innovative enhanced oil recovery technologies.

**The main aim** of the research is the efficiency analysis (from viewpoint of additional production) of tertiary technologies of enhanced oil recovery factor at fields of Yugra, which were introduced while operation.

**Object:** peculiarities and field-geological results of enhanced oil recovery methods at fields of Yugra (2013–2019): physical and chemical, hydrodynamic, hydraulic fracturing, horizontal drilling, sidetracking, bottomhole treatment and other methods – well interventions operations for optimization of well stock work.

**Methods.** Retrospective comparative analysis of performed enhanced oil recovery well operations and additional oil production: physical and chemical – 48016, hydrodynamic – 23374, hydraulic fracturing – 28454, horizontal drilling – 11225, sidetracking – 9010, bottomhole treatment – 44081, well interventions operations – 32123 operations.

**Results.** Field-geological and statistical reporting data of Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman and Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra was analyzed. A trend of stabilization of annual oil recovery is emerged in Yugra. Thereat, a fraction of additional oil production was increased from 9,4 % in 2013 to 16,0 % in 2019 due to application of enhanced oil recovery methods and well interventions operations. The major methods of intensification of production and enhanced oil recovery are physical and chemical, bottomhole treatment and hydrodynamic. The most effective methods, which provide additional production, are horizontal drilling, sidetracking and hydraulic fracturing. Application of enhanced oil recovery methods requires enhancement of scientific and technical explanation of optimal conditions of construction and operation of development systems. The fraction of hard to recover reserves of oil is about 60 % in average and for several companies is 75–80 %, for this reason today there is no alternative to development of tertiary enhanced oil recovery methods at the fields of Yugra.

**Key words:**

Hard to recover reserves, oil recovery factor, enhanced oil recovery methods, retrospective analysis, Yugra.

**REFERENCES**

1. *Novostnaye lenta IA Neftegaz.ru ot 28 avgusta 2019 g.* [News feed of media outlet Neftegaz.ru of 28 August, 2019]. Available at: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/483197-yugra-mozhet-stat-pilotnym-regionom-dlya-aprobatsii-novykh-tehnologiy-povysheniya-nefteotdachi/> (accessed 2 December 2019).
2. Tolstolytkin I.P., Mukharlyamova N.V., Pecherin T.N., Strelchenko M.V. Otsenka dobychnogo potentsiala neftyanykh mestorozhdeniy KhMAO–Yugry v sovremennykh usloviyakh [Estimation of production potential of oil fields of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra in modern conditions]. *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO. Dvadsat vtoraya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Ways of oil-and-gas potential implementation of Khanty-Mansi Autonomous Okrug. 22<sup>nd</sup> Research-to-Practice Conference]. Khanty-Mansiysk, IzdatNauka-Servis Publ., 2019. Vol. 1, pp. 15–23.
3. Kuzmenkov S.G., Isaev V.I., Bulatov V.I., Ayupov R.Sh., Eginbaeva N.O., Kuzmin Yu.A., Stulov P.A. Development of Yugra oil and gas complex, hard-to-extract reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 103–113. In Rus.
4. Kuzmenkov S.G., Kuzmin Yu.A., Stulov P.A., Ayupov R.Sh., Bulatov V.I., Eginbaeva N.O., Isaev V.I., Lobova G.A. Identification of hard to recover reserves of Ugra oil. *Geofizicheskii zhurnal*, 2018, vol. 41, no. 4, pp.114–124. In Rus.

5. Surguchev L.M. Obzor tretichnykh metodov uvelicheniya nefteotdachi [Overview of tertiary enhanced oil recovery methods]. *Neftyanoe hozyaystvo*, 2001, no. 5, pp. 50–54.
6. Romero-Zeron L. *Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR). Practical Overview*. Fredericton, IntechOpen, 2016. 200 p.
7. Hascakir B. Introduction to thermal Enhanced Oil Recovery (EOR). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, special issue, 2017, vol. 154, pp. 438–441.
8. Orenburkin A.V., Galkin N.Yu., Marina N.D., Kozelskaya N.V. Sopotavlenie vyrabotki zapasov nefi osnovnymi nedropolzovatelyami KhMAO–Yugry [Comparison of oil reserves production by major subsoil users of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra]. *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO. Dvadsat vtoraya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Ways of oil-and-gas potential implementation of Khanty-Mansi Autonomous Okrug. 22<sup>nd</sup> Research-to-Practice Conference]. Khanty-Mansiysk, IzdatNaukaServis Publ., 2019. Vol. 2, pp. 44–52.
9. Zhdanov S.A., Miyan A.V., Surguchev L.M., Castanier L.M., Hanssen J.E. Application of Foam for Gas and Water Shut-off: Review of Field Experience. *European Petroleum Congress*. Milan, Italy, Society of Petroleum Engineers, 1996. pp. 377–388.
10. Vladimirov I.V. *Nestatsionarnye tekhnologii nefteobychi (etapy razvitiya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy)* [Unsteady technologies of oil production (development stages, the current state and prospects)]. Moscow, OAO VNIIOYeNG Publ., 2004. 216 p.
11. Standnes D.C., Skjervak I. Literature review of implemented polymer field projects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, vol. 122, pp. 761–775.
12. Delamaide E. Comparison of steam and polymer injection for the recovery of heavy oil. *SPE Western Regional Meeting*. Bakersfield, California, USA, 2017. Paper SPE 185728.
13. Zhengbin Wu, Liu Huiqing, Xue Wang, Zequan Zhang. Emulsification and improved oil recovery with viscosity reducer during steam injection process for heavy oil. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, vol. 61, pp. 348–355.
14. Halin V.V., Mazitov R.F., Malshakov E.N., Khoryushin V.Yu., Demyanenko N.A. Opyt primeneniya potokootklonyayushchikh tekhnologiy povysheniya nefteotdachi plastov s ispolzovaniem reagenta «Produkt №1» na osnove titanovogo koagulyanta [Experience of diverter enhanced oil recovery technologies with usage of reagent «Product no. 1» on the base of titanium coagulant]. *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO. Dvadsat vtoraya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Ways of oil-and-gas potential implementation of Khanty-Mansi Autonomous Okrug. 22<sup>nd</sup> Research-to-Practice Conference]. Khanty-Mansiysk, IzdatNaukaServis Publ., 2019. Vol. 2, pp. 53–66.
15. Zakirov S.N., Zakirov I.S. *Novy podkhod k razrabotke neftegazovykh zalezhey* [New approach to oil-and-gas pool development]. Moscow, IRC Gazprom Publ., 1996. 51 p.
16. Economides M., Oligney R., Valkó P. *Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice*. Alvin, Texas, Orsa Press, 2002. 25 p.
17. Jin X., Shah S.N., Roegiers J., Zang B. Fracability evaluation in shale reservoirs – an integrated petrophysics and geomechanics approach. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. Woodlands, Texas, USA, 2014. Paper SPE 168589.
18. Cherevko M.A., Yanin A.N., Yanin K.E. *Razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri gorizontnymi skvazhinami s mnogostadiynymi gidrorazryvami plasta* [Development of oil fields of Western Siberia with horizontal wells by multistage hydraulic fracturing]. Tumen; Kurgan, Zauralye Publ., 2015. 268 p.
19. Saunin V.I., Shalamos M.A., Yagafarov A.K. Effektivnost stroitelstva i ekspluatatsii gorizontnykh skvazhin na Samotlorskom mestorozhdenii (plast AV 1/1-2 «ryabchik») [Efficiency of construction and operation of horizontal wells on Samotlor Field (AB 1/1-2 formation «Ryabchik»)]. *Neftepromyslovoe delo*, 2007, no. 11, pp. 59–62.
20. Akangbou H.N., Burby M., Nasr Gh. Effectively optimizing production of horizontal wells in homogeneous oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 150, pp. 128–136.
21. Szanyi M.L., Hemmingsen C.S., Wei Yan, Walther J.H., Glimberg S.L. Near-wellbore modeling of a horizontal well with Computational Fluid Dynamics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 119–128.
22. Zakirov I.S., Vladimirov I.V. Horizontal and vertical wells relation at wells density grid determination. *Oil Industry*, 2008, no. 8, pp. 66–67. In Rus.
23. Iskhakov R.R., Voronov S.A., Ermolaev A.I., Voronova V.V. Methodical approaches of second wellbore designing at the last stage of Western Siberian fields development. *Oil Industry*, 2012, no. 1, pp. 38–41. In Rus.

Received: 2 February 2020.

#### Information about the authors

**Stanislav G. Kuzmenkov**, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

**Roman Sh. Ayupov**, Cand. Sc., associate professor, Yugra State University.

**Maksim V. Novikov**, deputy director, Department of Subsurface Management & Natural Resources of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra.

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

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

**Petr A. Stulov**, first deputy director, Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman.

**Vitaliy S. Butin**, chief of laboratory, Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil named after V.I. Shpilman.

**Elena O. Astapenko**, Cand. Sc., associate professor, Yugra State University.

УДК 622.276.66

## НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА (НА ПРИМЕРЕ БОБРИКОВСКОЙ ЗАЛЕЖИ ШЕРШНЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

Галкин Владислав Игнатьевич<sup>1</sup>,  
vgalkin@pstu.ru

Пономарева Инна Николаевна<sup>1</sup>,  
permpolitech@gmail.com

Черепанов Сергей Сергеевич<sup>2</sup>,  
sergej.s.cherepanov@lukoil.com

Филиппов Евгений Владимирович<sup>2</sup>,  
evgenij.filippov@lp.lukoil.com

Мартушев Дмитрий Александрович<sup>1</sup>,  
martyushevdi@inbox.ru

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

<sup>2</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»,  
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Ленина, 62.

**Актуальность** исследования обусловлена значительным вкладом объемов нефти, добытых в результате проведения на скважинах гидравлического разрыва пласта, в суммарную добычу. Правильная оценка результатов фактически проведенных мероприятий по гидравлическому разрыву позволит выработать четкие рекомендации по дальнейшему применению данного метода интенсификации добычи нефти для геолого-физических условий конкретных месторождений.

**Цель:** оценить результаты проведения гидравлического разрыва пласта применительно к элементу системы разработки, в котором находится скважина – объект воздействия.

**Объекты:** нефтескважины – элемент системы разработки бобриковской залежи Шершневского нефтяного месторождения.

**Методы:** геолого-промысловые исследования, корреляционный анализ, схематизация взаимодействия между скважинами.

**Результаты.** Установлено, что проведение гидравлического разрыва пласта на скважине 221 Шершневского месторождения привело к изменению характера взаимодействия между скважинами в пределах всего элемента системы разработки, который стал работать как единая однонаправленно согласованная система. В результате гидравлического разрыва пласта произошло не просто перераспределение объемов дренирования, а возник синергетический эффект, когда проведение мероприятия в одной скважине привело к росту дебитов и согласованности работы всего элемента системы разработки. Вероятно, проведение гидравлического разрыва пласта в скважине 221 привело к существенному изменению фильтрационных параметров бобриковской залежи Шершневского месторождения в более значительных пределах, нежели объем зоны дренирования этой скважины, и на довольно большом участке залежи возникла целая система каналов с пониженными фильтрационными сопротивлениями, а не единичная трещина, как это принято в классическом представлении.

### Ключевые слова:

Гидравлический разрыв пласта, терригенный коллектор, взаимодействие между скважинами, корреляция дебитов, метод увеличения нефтеотдачи.

### Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) в настоящее время является одним из эффективных методов интенсификации добычи нефти во всем мире. Адекватная оценка результатов проведенных ГРП позволяет, в том числе, оценивать перспективы метода в тех или иных геологических условиях.

На территории Пермского края применяются самые разнообразные технологии проведения ГРП, такие как классический пропантный в терригенных коллекторах, кислотный – в карбонатных, кислотный ГРП с закреплением трещин пропантом, азотно-пенный ГРП и др. [1–4]. Эффективность этих технологий обычно оценивают по приросту дебита нефти на скважинах – объектах воздействия. Помимо прироста дебита, в ряде случаев используют также такие показатели технологической

эффективности, как дополнительная добыча нефти и продолжительность эффекта, вычисляя эти показатели также применительно к скважинам, на которых ГРП был проведен [5–10]. Такой подход к оценке результатов ГРП обусловлен тем, что данный вид воздействия на пласт принято относить к группе технологий интенсификации притока к скважинам. В частности, в [11–16] сказано, что гидравлический разрыв проводят с целью повышения проницаемости коллектора в призабойной зоне и увеличения производительности скважины. Однако некоторые исследователи [17–23] считают, что ГРП в определенных условиях является не только способом увеличения проницаемости призабойной зоны и, как следствие, продуктивности конкретной скважины, но и глубокопроникающим методом воздействия на продуктивные пласты в целом.

**Таблица 1.** Краткая информация о скважине – объекте ГРП

**Table 1.** Summary of the borehole – hydraulic fracturing site

Наименование показателя, ед. изм. Parameter, measurement unit	Значение Value
Абсолютная отметка кровли, м Absolute roof mark, m	-1846
Эффективная нефтенасыщенная толщина, м Effective net payable thickness, m	9,9
Вязкость пластовой нефти, мПа*с Viscosity of reservoir oil, MPa*s	3,19
Газонасыщенность пластовой нефти, м <sup>3</sup> /т Gas saturation of reservoir oil, m <sup>3</sup> /t	64,2
Давление насыщения нефти газом, МПа Pressure of oil gas saturation, MPa	11,94
Коэффициент пористости, д. ед. Porosity factor, fraction of units	0,17
Коэффициент песчаности, д. ед. Sandiness coefficient, fraction of units	0,6
Расчлененность, д. ед. Dismemberment, fraction of units	3,21
Коэффициент проницаемости*, мкм <sup>2</sup> Permeability coefficient*, μm <sup>2</sup>	0,096
Обводненность продукции до ГРП, % Water cut before hydraulic fracturing, %	1
Забойное давление до ГРП, МПа Bottom pressure before hydraulic fracturing, MPa	9,55
Пластовое давление до ГРП, МПа Reservoir pressure before hydraulic fracturing, MPa	12,97

\*Примечание: коэффициент проницаемости определен по данным гидродинамических исследований перед ГРП.

\*Note: permeability coefficient determined by hydrodynamic studies before hydraulic fracturing.

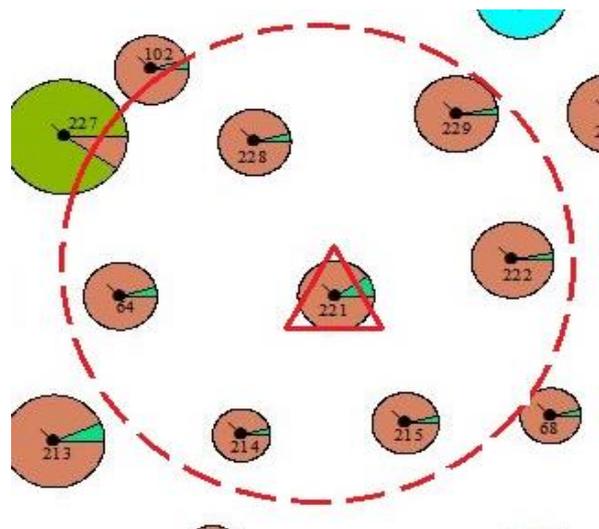
#### Общие сведения об объекте исследования

В настоящей статье приводятся сведения о результатах ГРП, проведенного в октябре 2011 г. на скважине 221 Шершневого нефтяного месторождения (Пермский край). Скважина эксплуатирует терригенную бобриковскую залежь, её характерным признаком является размещение практически в центральной части структуры. Отложения бобриковского горизонта представлены преимущественно песчаниками кварцевыми, иногда с прослоями аргиллитов и алевролитов неравномерно глинистых, участками сильно песчаных до перехода в песчаник. Песчаники, разномерные с различными нефтепроявлениями – от выпотов нефти по порам до полного нефтенасыщения, можно отнести к русловому аллювию, к которому и приурочена промышленная нефтеносность. Краткие сведения о геолого-физической характери-

стике объекта разработки и параметрах работы скважины представлены в табл. 1. Информация о других шести нефтедобывающих скважинах, участвующих в оценке влияния ГРП, представлена в табл. 2.

Стандартные подходы к определению технологической эффективности геолого-технических мероприятий позволили оценить результаты ГРП на данной скважине как весьма высокие для региона. Дебит скважины увеличился практически в три раза, эффект сохранялся на протяжении более чем 2000 сут.

В данной статье выполнено исследование, нацеленное на изучение влияния проведения гидроразрыва не только на показатели эксплуатации самой скважины – объекта ГРП, но и на окружающие скважины, то есть на элемент системы разработки [24–29]. Так, в непосредственной близости от рассматриваемой в статье скважины 221 расположены шесть добывающих скважин (№№ 64, 214, 215, 222, 228 и 229), совместно образующих условный первый кольцевой ряд (рис. 1). На рис. 2 представлена карта распределения плотности остаточных извлекаемых запасов для рассматриваемого элемента разработки на момент проведения ГРП.



**Рис. 1.** Схема элемента системы разработки бобриковской залежи Шершневого месторождения

**Fig. 1.** Diagram of the element of the development system of Bobrikovsky deposits of Shershnevsky field

**Таблица 2.** Краткая информация о параметрах работы соседних скважин, участвующих в оценке влияния ГРП

**Table 2.** Brief information on operating parameters of neighboring wells participating in evaluation of the effect of hydraulic fracturing

№ скважины Wells	Коэффициент проницаемости, мкм <sup>2</sup> Permeability coefficient, μm <sup>2</sup>	Эффективная нефтенасыщенная толщина, м Effective net payable thickness, m	Пластовое давление до ГРП, МПа Reservoir pressure before hydraulic fracturing, MPa	Забойное давление до ГРП, МПа Bottom pressure before hydraulic fracturing, MPa	Обводненность продукции до ГРП, % Water cut before hydraulic fracturing, %
215	0,909	8,7	11,59	10,25	1,0
222	0,206	10,8	12,92	10,06	0
229	1,716	11,2	11,21	9,79	0
228	0,111	14,7	12,78	11,76	2,0
64	0,456	5,4	13,10	11,71	3,0
214	0,078	12,6	12,77	9,77	5,0

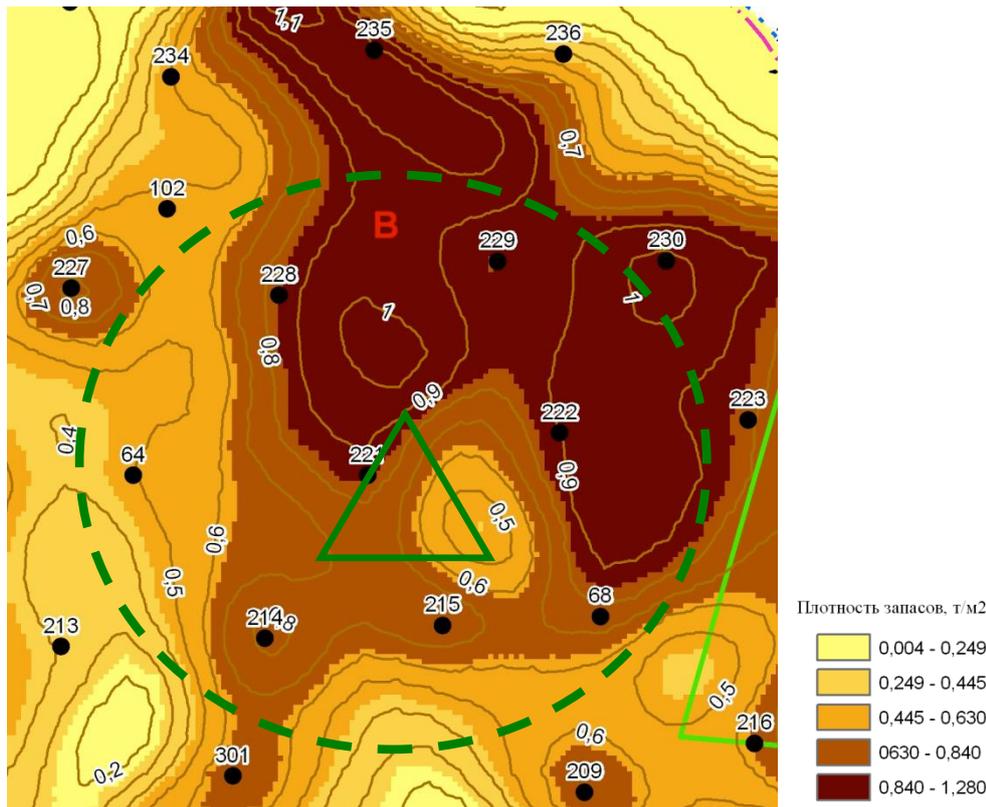


Рис. 2. Схема элемента системы разработки бобриковской залежи Шершневого месторождения с распределением плотности подвижных запасов на момент проведения ГРП

Fig. 2. Diagram of an element of the Bobrikovskoye deposits development system at the Shershnevskoye field with distribution of mobile reserves density at hydraulic fracturing

#### Исследование взаимодействия между скважинами до и после проведения ГРП

Очевидно, если гидроразрыв пласта, выполненный в скважине 221, имел глубокопроникающий характер, о чем косвенно свидетельствуют высокие значения показателей технологической эффективности, ближайшие добывающие скважины должны «отреагировать» изменением значений своих показателей эксплуатации. Для проверки данной гипотезы привлечены и проанализированы промысловые материалы – дебиты нефти и жидкости, а также накопленные значения добычи нефти и жидкости по всем скважинам выделенного элемента разработки.

На первом этапе выполнено сопоставление показателей эксплуатации в периоды до и после ГРП. При этом показатели до ГРП отнесены к классу 1 (выборка составила  $n=69$  значений), после ГРП – к классу 2 ( $n=81$  значение). Сравнение средних значений дебитов жидкости для классов 1 и 2, то есть до и после ГРП, выполнено с использованием инструментов математической статистики (t-критерия Стьюдента и  $\chi^2$  критерия Пирсона), результаты сравнения приведены в табл. 3.

Представленные в таблице данные статистически подтверждают изменение (увеличение) дебитов жидкости после проведения ГРП для всех скважин выделенного элемента системы разработки, а не только для скважины 221 – объекта проведенного ГРП.

Таблица 3. Сравнение средних значений дебитов жидкости ( $m^3/сутки$ ) до и после ГРП для скважин выделенного элемента системы разработки

Table 3. Comparison of the average values of fluid production rates ( $m^3/day$ ) before and after fracturing for well development system selected element

№ скв./Wells	Статистические характеристики показателей Statistical characteristics of indicators		Критерий сравнения* Comparison criterion*	
	Класс 1 (до ГРП) Class 1 (before hydraulic fracturing)	Класс 2 (после ГРП) Class 2 (after hydraulic fracturing)	Стьюдента Styudent	Пирсона Pearson
64	21,9±17,6	48,1±12,1	$\frac{-10,724}{0,000}$	$\frac{85,483}{0,000}$
214	13,8±13,7	22,9±3,7	$\frac{-5,773}{0,000}$	$\frac{36,027}{0,000}$
215	29,1±14,4	37,4±5,0	$\frac{-4,833}{0,000}$	$\frac{29,127}{0,014}$
222	36,1±15,9	60,3±8,9	$\frac{-11,681}{0,000}$	$\frac{135,111}{0,014}$
228	30,5±6,6	43,7±3,9	$\frac{-14,997}{0,000}$	$\frac{134,260}{0,000}$
229	47,6±12,9	55,9±5,8	$\frac{-5,228}{0,000}$	$\frac{24,509}{0,014}$

\*Примечание: в числителе приведено значение критерия, в знаменателе – уровень его значимости.

\*Note: the numerator shows the value of the criterion, in the denominator – the level of its importance.

Аналогичный вывод получен также при сравнении дебитов нефти, накопленной добычи нефти и жидкости, характерных для периодов эксплуатации до и после ГРП. Проведение ГРП на скважине 221 привело к увеличению не только ее дебита, но и дебитов всех соседних, расположенных в непосредственной близости, скважин. Проведенное ГРП на скважине 221 нельзя рассматривать как геолого-техническое мероприятие, направленное только лишь на интенсификацию притока непосредственно к этой скважине. Также следует отметить, что во всех случаях причиной прироста не явилось проведение каких-либо геолого-технических мероприятий. Предположение о том, что в результате ГРП происходит простое перераспределение объемов дренирования между соседними скважинами в пользу скважины-объекта воздействия, также не является правильным, поскольку в этом случае имело бы место снижение дебитов соседних скважин.

На следующем этапе исследования выполнена оценка взаимного влияния скважин, с этой целью использованы инструменты корреляционного анализа. Результаты исследования в виде корреляционных матриц, характеризующих взаимную связь между дебитами нефти, приведены в табл. 4.

С целью визуализации полученных результатов построены схемы изменения коэффициентов корреляции

между дебитами нефти в пределах элемента разработки до (рис. 3) и после ГРП (рис. 4).

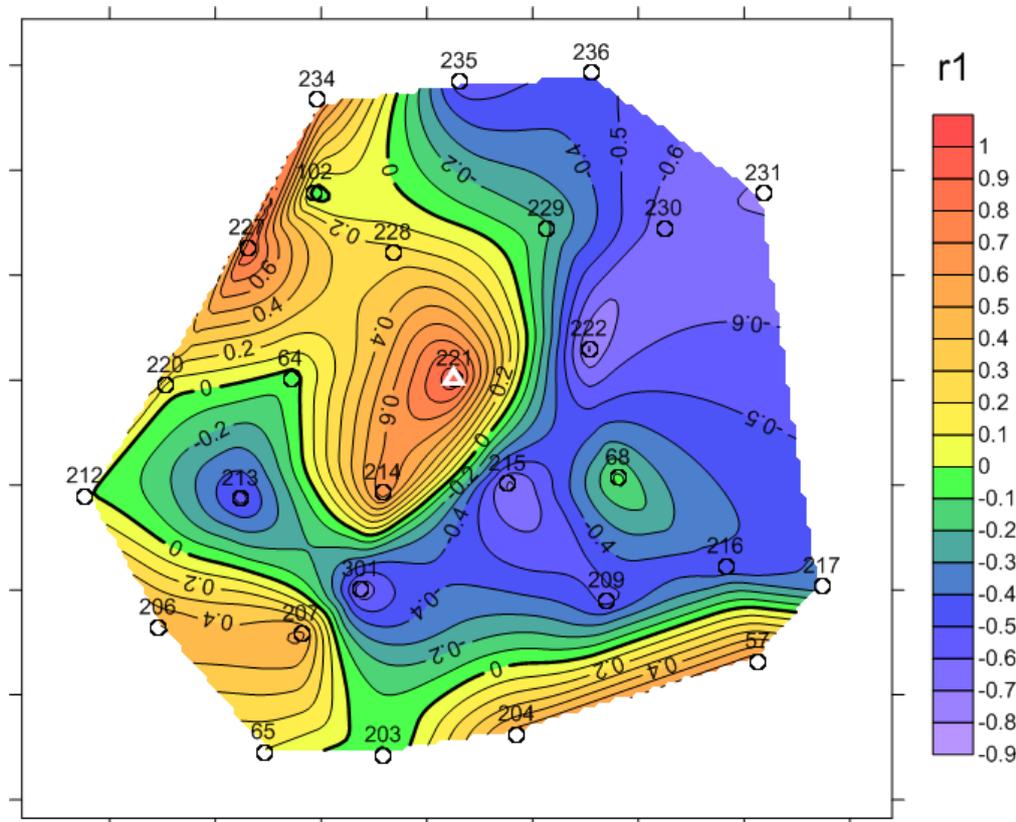
**Таблица 4.** Корреляционная матрица между значениями дебитов нефти скважин выделенного элемента разработки (числитель – до ГРП, знаменатель – после ГРП)

**Table 4.** Correlation matrix between the values of oil flow rates of wells of the selected design element (numerator – before fracturing, denominator – after fracturing)

Скважины Wells	221	64	214	215	222	228	229
221	1,00 1,00	-0,10 0,68*	0,65* 0,63*	-0,72* 0,69*	-0,81* 0,64*	0,24* 0,69*	-0,17 0,54*
64		1,00 1,00	0,57* 0,93*	-0,29* 0,83*	-0,23 0,67*	-0,05 0,72*	-0,52* 0,73*
214			1,00 1,00	-0,74* 0,82*	-0,74* 0,72*	0,13 0,76*	-0,45* 0,81*
215				1,00 1,00	0,82* 0,75*	-0,02 0,69*	0,32* 0,74*
222					1,00 1,00	-0,08 0,53*	0,38* 0,74*
228						1,00 1,00	-0,13 0,79*
229							1,00 1,00

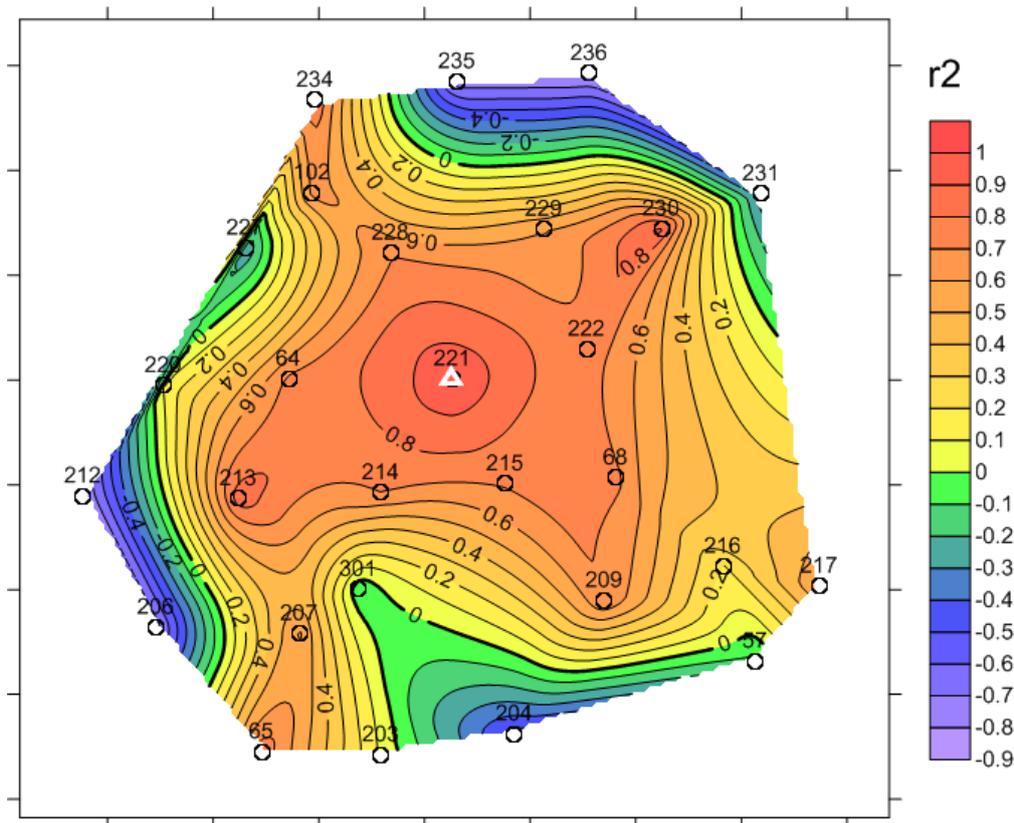
Примечание: -0,65\* – значимые корреляционные связи.

Note: -0,65\* – significant correlation.



**Рис. 3.** Схема изменения значений коэффициентов корреляции между дебитами нефти в пределах элемента разработки до проведения ГРП

**Fig. 3.** Scheme of changes in the values of correlation coefficients between oil flow rates within the development element before hydraulic fracturing



**Рис. 4.** Схема изменения значений коэффициентов корреляции между дебитами нефти в пределах элемента разработки после проведения ГРП

**Fig. 4.** Diagram of changes in the values of the correlation coefficients between oil flow rates within the development element after hydraulic fracturing

Из анализа представленной на рис. 3 схемы следует, что за период, предшествующий ГРП, максимальные положительные корреляции характерны для пары скважин – 221, 214, то есть эти скважины работали согласованно, они синхронно реагировали на какие-либо события однонаправленным изменением своего дебита. Восточная часть выделенного элемента разработки характеризуется довольно сильной отрицательной корреляцией. То есть увеличение дебита скважины 221 приводило к снижению аналогичного показателя в скважинах 215 и 222. Вероятно, увеличение дебитов скважины 221 происходило за счет перераспределения объемов дренирования с восточной части выделенного элемента разработки.

Анализ представленной на рис. 4 схемы демонстрирует существенное изменение в поведении всего выделенного элемента системы разработки в результате проведения ГРП на скважине 221. В пределах первого кольцевого ряда между дебитами всех скважин отмечается значимая положительная корреляция. То есть весь элемент стал работать как единая однонаправленно согласованная система. Положительный характер корреляции свидетельствует о том, что в результате ГРП произошло не просто перераспределение объемов дренирования, а возник синергетический эффект, когда проведение мероприятия в одной скважине привело к росту дебитов и согласованности работы всего элемента системы разработки.

#### Заключение

Полученный в ходе исследований вывод свидетельствует о том, что общепринятая модель результата ГРП, заключающаяся в визуализации трещины в пределах зоны дренирования скважины – объекта ГРП, а в некоторых случаях – только в пределах призабойной зоны этой скважины, не отражает картины, произошедшей на бобриковской залежи Шершневого месторождения. Проведение ГРП в скважине 221 привело к существенному изменению фильтрационных параметров бобриковской залежи Шершневого месторождения в более значительных пределах, нежели объем зоны дренирования этой скважины. На довольно большом участке залежи возникла целая система каналов с пониженными фильтрационными сопротивлениями, а не единичная трещина, как это принято в классическом представлении. Применительно к рассматриваемой залежи ГРП следует считать не как единичный, точечный метод интенсификации добычи нефти вследствие увеличения продуктивности скважины – объекта воздействия, а даже, в некоторой степени, как метод увеличения нефтеотдачи.

Безусловно, единичность проведенного исследования не позволяет делать выводов о необходимости пересмотра подходов к оценке результатов ГРП. Представляется целесообразным проведение аналогичных исследований на других скважинах данного и других регионов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восстановление и повышение продуктивности добывающих скважин каширского и подольского объектов на одном из нефтяных месторождений Пермского края / А.С. Вотинов, С.А. Дроздов, В.Л. Малышева, В.А. Мордвинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 140–148.
2. Черепанов С.С., Чумаков Г.Н., Пономарева И.Н. Результаты проведения кислотного гидроразрыва пласта с пропантом на турнейско-фаменской залежи Озерного месторождения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – Т. 14. – № 16. – С. 70–76.
3. Развитие технологий гидравлического разрыва пласта на месторождениях Пермского края / В.Л. Воеводкин, А.А. Алероев, Т.Р. Балдина, А.В. Распопов, А.С. Казанцев, С.А. Кондратьев // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 108–113.
4. Кулакова П.А., Кутлубулатов А.А., Афанасенко В.Г. Прогнозирование эффективности гидравлического разрыва пласта как составляющая оптимизации его дизайна // SOCAR Proceedings. – 2018. – № 2. – С. 41–48.
5. Анализ эффективности технологии гидроразрыва терригенных пластов на Южно-Ромашкинской площади Ромашкинского месторождения в условиях поздней стадии разработки / И.Ф. Галимов, Ф.А. Губайдина, А.В. Вахин, П.В. Исаев // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 52–54.
6. Совершенствование методического подхода к планированию мероприятий по гидроразрыву пласта на нефтяных месторождениях / И.В. Буренина, Л.А. Авдеева, М.А. Халикова, М.В. Герасимова, И.А. Соловьева // Записки горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 344–353.
7. Бархатов Э.А., Яркиева Н.Р. Эффективность применения многозонного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 50–58.
8. Проведение пропантных гидроразрывов низкопроницаемых пластов на нефтяных месторождениях немецкого автономного округа / А.А. Алероев, С.А. Кондратьев, Р.Р. Шарафев, Д.В. Новокрещенных, В.А. Жигалов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 9. – С. 108–111.
9. Amir Ghaderi, Jaber Taheri-Shakib, Mohamad Amin Sharifnik. The effect of natural fracture on the fluid leak-off in hydraulic fracturing treatment // Petroleum. – March 2019. – V. 5. – Iss. 1. – P. 85–89.
10. Initiation, propagation, closure and morphology of hydraulic fracturing in sandstone cores / Jianming He, Chong Lin, Xiao Li, Yixiang Zhang, Yi Chen // Fuel. – 15 November 2017. – V. 208. – P. 65–70.
11. Мирзаджанзаде А.Х. Технология и техника добычи нефти. – М.: Недра, 1986. – 382 с.
12. Chukwudi Chukwudozie, Blaise Bourdin, Keita Yoshioka. A variational phase-field model for hydraulic fracturing in porous media // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 15 April 2019. – V. 347. – P. 957–982.
13. Han Yi Wang, Mukul M. Sharma. Modeling of hydraulic fracturing closure on proppants with proppant settling // Journal of Petroleum Science and Engineering. – December 2018. – V. 171. – P. 636–645.
14. Determination of stimulated reservoir volume and anisotropic permeability using analytical modelling of microseismic and hydraulic fracturing parameters / Yew Kwang Yong, Belladonna Maulianda, Sia Chee Wee, Dzeti Mohshim, David Eaton // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – October 2018. – V. 58. – P. 234–240.
15. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs / Lei Li, Jingqiang Tan, D.A. Wood, Zhengguang Zhao, Haichao Chen // Fuel. – April 2019. – V. 242. – P. 195–210.
16. Three-dimensional lattice simulation of hydraulic fracturing interaction with natural fractures / Wei Fu, A.A. Savitski, B. Damjanac, A.P. Bungler // Computers and Geotechnics. – March 2019. – V. 107. – P. 214–234.
17. Ибрагимов Л.Х., Мищенко И.Т., Челоянц Д.К. Интенсификация добычи нефти. – М.: Наука, 2000. – 414 с.
18. Муслимов Р.Х. Нефтеотдача: прошлое, настоящее, будущее. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2014. – 750 с.
19. Оценка эффективности ГРП с учетом образованных геологических тел / Р.З. Нургалиев, Р.И. Галлямов, А.А. Махмутов, Е.В. Корнев, А.В. Астахов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 3. – С. 57–62.
20. Debotyam Maity, Jordan Ciezobka. Using microseismic frequency-magnitude distributions from hydraulic fracturing as an incremental tool for fracture completion diagnostics // Journal of Petroleum Science and Engineering. – May 2019. – V. 176. – P. 1135–1151.
21. Interpretation of the extent of hydraulic fracturing for rockburst prevention using microseismic monitoring data / Qunjie Zhu, Yu Feng, Ming Cai, Jinhai Liu, Honghui Wang // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – February 2017. – V. 38. – P. 107–119.
22. Nithin Manohar Rayudu, Xuhai Tang, Gaurav Singh. Simulating three dimensional hydraulic fracturing propagation using displacement correlation method // Tunnelling and Underground Space Technology. – March 2019. – V. 85. – P. 84–91.
23. Hydraulic fracturing in high-temperature granite characterized by acoustic emission / Yuekun Xing, Guangqing Zhang, Tianyu Luo, Yongwang Jiang, Shiwen Ning // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2019. – V. 178. – P. 475–484.
24. Юдин Е.В., Губанова А.Е., Краснов В.А. Метод оценки интерференции скважин с использованием данных технологических режимов их эксплуатации // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 8. – С. 64–69.
25. Особенности влияния интерференции скважин на эффективность гидравлического и газодинамического разрыва пласта / Р.З. Нургалиев, И.Р. Мухлиев, Л.Р. Сагидуллин, И.Ш. Щекатурова, А.А. Рахматуллин // Нефтепромышленное дело. – 2018. – № 3. – С. 29–34.
26. Оценка результатов гидравлического разрыва пласта на основе комплексного анализа данных микросейсмического мониторинга и геолого-промысловой информации / А.В. Растегаев, И.А. Черных, И.Н. Пономарева, Д.А. Мартюшев // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 122–125.
27. Impact of the distance between pre-existing fracture and wellbore on hydraulic fracturing propagation / Bo Zhang, Jiyang Liu, S.G. Wang, Shucui Li, Weimin Yang // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – September 2018. – V. 57. – P. 155–165.
28. An analysis of tracer flowback profiles to reduce uncertainty in fracture network geometries / Linkai Li, Hanqiao Jiang, Keliu Wu, Junjian Li, Zhangxin Chen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 173. – P. 246–257.
29. Tarek A. Ganata, Meftah Hrairi. A new choke correlation to predict flow rate of artificially flowing wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 171. – P. 1378–1389.

Поступила 12.03.2020 г.

## Информация об авторах

**Галкин В.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Пономарева И.Н.**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Черепанов С.С.**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по геологии и разработке ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

**Филиппов Е.В.**, начальник управления разработки нефтяных и газовых месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

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

UDC 622.276.66

## NEW APPROACH TO THE STUDY OF THE RESULTS OF HYDRAULIC FRACTURING (ON THE EXAMPLE OF BOBRIKOVSKY DEPOSITS OF THE SHERSHNEVSKY FIELD)

Vladislav I. Galkin<sup>1</sup>,  
vgalkin@pstu.ru

Inna N. Ponomareva<sup>1</sup>,  
permpolitech@gmail.com

Sergey S. Cherepanov<sup>2</sup>,  
sergej.s.cherepanov@lukoil.com

Evgeniy V. Filippov<sup>2</sup>,  
evgenij.filippov@lp.lukoil.com

Dmitriy A. Martyushev<sup>1</sup>,  
martyushevdi@inbox.ru

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

<sup>2</sup> LLC LUKOIL-PERM,  
62, Lenin street, Perm, 614990, Russia.

**The relevance** of the research is caused by significant contribution of oil produced as a result of hydraulic fracturing at the wells to its total production. Correct assessment of the results of actually carried out measures for hydraulic fracturing will make it possible to develop clear recommendations on the further application of this method of intensifying oil production for geological and physical conditions of specific fields.

**The main aim** of the research is to evaluate the effect of hydraulic fracturing in relation to the element of the development system in which the well is located – the object of impact.

**Object:** oil producing wells that make up an element of the reservoir development system.

**Method:** geological field research, correlation analysis, schematization of the interaction between wells.

**Results.** It was found that the hydraulic fracturing of the well 221 of the Shershnevsky field led to a change in the nature of interaction between the wells within the entire element of the development system, which began to work as a single, unidirectional coordinated system. As a result of hydraulic fracturing, there was no redistribution of drainage volumes, but a synergistic effect arose when holding an event in one well led to an increase in flow rates and consistency of the entire element of the development system. Probably, the conduction of hydraulic fracturing in the well 221 led to a significant change in the reservoir filtration parameters in more significant limits than the volume of the drainage zone of this well, and rather large system of channels with reduced filtration resistance appeared in rather large area of the reservoir, as it is customary in classic presentation.

### Key words:

Hydraulic fracturing, terrigenous reservoir, interaction between wells, correlation of flow rates, method of enhanced oil recovery.

### REFERENCES

- Votinov A.S., Drozdov S.A., Malysheva V.L., Mordvinov V.A. Restoration and increase of productivity of producing wells of the Kashirsky and Podolsk facilities at one of the oil fields of the Perm Krai. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Geology. Oil and gas and mining*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 140–148. In Rus.
- Cherepanov S.S., Chumakov G.N., Ponomareva I.N. Results of acid fracturing with proppant at the Tournaisian and Famennian deposits of the Ozernoe field. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Geology. Oil and gas and mining*, 2015, vol. 14, no. 16, pp. 70–76. In Rus.
- Voevodkin V.L., Aleroev A.A., Baldina T.R., Raspopov A.V., Kazantsev A.S., Kondratiev S.A. Development of hydraulic fracturing technologies in the fields of the Perm Krai. *Oil industry*, 2018, no. 11, pp. 108–113. In Rus.
- Kulakova P.A., Kutlubulatov A.A., Afanasenko V.G. Predicting the effectiveness of hydraulic fracturing as a component of optimizing its design. *SOCAR Proceedings*, 2018, no. 2, pp. 41–48. In Rus.
- Galimov I.F., Gubaidina F.A., Vakhin A.V., Isaev P.V. Analysis of the effectiveness of hydraulic fracturing of terrigenous reservoirs in the Yuzhno-Romashkinskaya area of the Romashkinskoe field in the late development stage. *Oil Industry*, 2018, no. 1, pp. 52–54. In Rus.
- Bureninia I.V., Avdeeva L.A., Halikova M.A., Gerasimova M.V., Solovieva I.A. Improving the methodological approach to planning measures for hydraulic fracturing in oil fields. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 344–353. In Rus.
- Barkhatov E.A., Yarkееva N.R. The effectiveness of multi-zone hydraulic fracturing in horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 50–58. In Rus.
- Aleroev A.A., Kondratiev S.A., Sharafayev R.R., Novokreshchenykh D.V., Zhigalov V.A. Carrying proppant fracturing low permeability reservoirs in the oil fields of the German autonomous region. *Oil Industry*, 2017, no. 9, pp. 108–111. In Rus.
- Amir Ghaderi, Jaber Taheri-Shakib, Mohamad Amin Sharifnik. The effect of natural fracture on the fluid leak-off in hydraulic fracturing treatment. *Petroleum*, March 2019, vol. 5, Iss. 1, pp. 85–89.
- Jianming He, Chong Lin, Xiao Li, Yixiang Zhang, Yi Chen. Initiation, propagation, closure and morphology of hydraulic fracturing in sandstone cores. *Fuel*, 15 November 2017, vol. 208, pp. 65–70.
- Mirzadzhanzade A.Kh. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefi* [Technology and technique of oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 382 p.

12. Chukwudi Chukwudozie, Blaise Bourdin, Keita Yoshioka. A variational phase-field model for hydraulic fracturing in porous media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 15 April 2019, vol. 347, pp. 957–982.
13. HanYi Wang, Mukul M. Sharma. Modeling of hydraulic fracturing closure on proppants with proppant settling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, December 2018, vol. 171, pp. 636–645.
14. Yew Kwang Yong, Maulianda Belladonna, Sia Chee Wee, Mohshim Dzeti, Eaton David. Determination of stimulated reservoir volume and anisotropic permeability using analytical modelling of microseismic and hydraulic fracturing parameters. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, October 2018, vol. 58, pp. 234–240.
15. Lei Li, Jingqiang Tan, Wood D.A., Zhengguang Zhao, Haichao Chen. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs. *Fuel*, April 2019, vol. 242, pp. 195–210.
16. Wei Fu, Savitski A.A., Damjanac B., Bungler A.P. Three-dimensional lattice simulation of hydraulic fracturing interaction with natural fractures. *Computers and Geotechnics*, March 2019, vol. 107, pp. 214–234.
17. Ibragimov L.Kh., Mishchenko I.T., Cheloyants D.K. *Intensifikatsiya dobychi nefii* [Intensification of oil production]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 414 p.
18. Muslim R.H. *Neftotdachya: proshloe, nastoyashchee, budushchee* [Oil output: past, present, future]. Kazan, Fen Publ. House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2014. 750 p.
19. Nurgaliev R.Z., Gallyamov R.I., Makhmutov A.A., Kornev E.V., Astakhov A.V. Evaluation of the effectiveness of hydraulic fracturing taking into account the formed geological bodies. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2017, no. 3, pp. 57–62. In Rus.
20. Debotyam Maity, Jordan Ciezobka. Using microseismic frequency-magnitude distributions from hydraulic fracturing as an incremental tool for fracture completion diagnostics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, May 2019, vol. 176, pp. 1135–1151.
21. Quanjie Zhu, Yu Feng, Ming Cai, Jinhai Liu, Honghui Wang. Interpretation of the extent of hydraulic fracturing for rockburst prevention using microseismic monitoring data. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, February 2017, vol. 38, pp. 107–119.
22. Nithin Manohar Rayudu, Xuhai Tang, Gaurav Singh. Simulating three-dimensional hydraulic fracturing propagation using displacement correlation method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, March 2019, vol. 85, pp. 84–91.
23. Yuekun Xing, Guangqing Zhang, Tianyu Luo, Yongwang Jiang, Shiwen Ning. Hydraulic fracturing in high-temperature granite characterized by acoustic emission. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2019, vol. 178, pp. 475–484.
24. Yudin E.V., Gubanova A.E., Krasnov V.A. Method of assessing the interference of wells using the data of the technological modes of their operation. *Oil industry*, 2018, no. 8, pp. 64–69. In Rus.
25. Nurgaliev R.Z., Mukhliev I.R., Sagidullin L.R., Shchekaturova I.Sh., Rakhmatullin A.A. Peculiarities of the influence of well interference on the effect of hydraulic and gas-dynamic fracturing. *Oil-field business*, 2018, no. 3, pp. 29–34. In Rus.
26. Rastegaev A.V., Chernykh I.A., Ponomareva I.N., Martyushev D.A. Assessment of the results of hydraulic fracturing based on a comprehensive analysis of microseismic monitoring data and geological and field information. *Oil Industry*, 2019, no. 8, pp. 122–125. In Rus.
27. Bo Zhang, Jiyang Liu, Wang S.G., Shucui Li, Weimin Yang. Impact of the distance between pre-existing fracture and wellbore on hydraulic fracturing propagation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, September 2018, vol. 57, pp. 155–165.
28. Linkai Li, Hanqiao Jiang, Keliu Wu, Junjian Li, Zhangxin Chen. An analysis of tracer flowback profiles to reduce uncertainty in fracture network geometries. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 173, pp. 246–257.
29. Tarek A. Ganata, Meftah Hrairi. A new choke correlation to predict flow rate of artificially flowing wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 171, pp. 1378–1389.

*Received: 12 March 2020.*

#### Information about the authors

**Vladislav I. Galkin**, Dr. Sc., professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Inna N. Ponomareva**, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Sergey S. Cherepanov**, Cand. Sc., deputy general director, Geology and Development LLC LUKOIL-PERM.

**Evgeniy V. Filippov**, head of the Department for Development of Oil and Gas Fields, LLC LUKOIL-PERM.

**Dmitriy A. Martyushev**, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 621.314.58:681.5.015

## ГОЛОМОРФНОЕ ПОГРУЖЕНИЕ КАК АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Исаев Юсуп Ниязбекович<sup>1</sup>,  
isaev\_yusup@mail.ru

Кабалин Дмитрий Андреевич<sup>1</sup>,  
mitya.kabalin@gmail.com

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

*Для того чтобы обеспечить требуемый уровень надежного функционирования объектов нефтедобычи, необходимо обращать внимание на условия эксплуатации энергосистемы. Это важно, если принять во внимание, что для добычи нефти и газа необходимы достаточно мощные источники энергии, которые существенно влияют на режим работы электросети. При этом актуальным является задача расчета установившихся режимов электрической сети, питающей объекты нефтедобычи. Расчеты установившихся режимов имеют большое практическое значение для обеспечения эффективного и безопасного управления режимами работы нефтяных и газовых предприятий, являются важными при проектировании электрических сетей, питающих объекты нефтегазовых предприятий. Однако применение классических итерационных методов расчета установившихся режимов, таких как метод Гаусса–Зайделя и Ньютона–Рафсона, не всегда позволяет найти правильное решение системы нелинейных уравнений, описывающих установившиеся режимы работы сети, так как сходимость данных методов зависит от начальных приближений. В работе предлагается аналитический метод расчета установившихся режимов электрических сетей, описываемых нелинейными уравнениями. Метод основан на аппроксимации Паде и методе возмущений. Приводятся преимущества метода перед известным методом итераций Гаусса–Зайделя и Ньютона–Рафсона. Приводятся примеры решения задач электроэнергетических сетей, и обсуждаются недостатки предлагаемого метода. Рассматриваются проблемы устойчивости.*

**Цель:** применить аналитический метод голоморфного погружения для расчета двух и трехузловой энергетической схемы; сравнить возможности метода с другими альтернативными методами; исследовать ограничения метода голоморфного погружения и показать область его работы.

**Методы:** разложение Тейлора, аналитическое продолжение, решения алгебраических уравнений рекуррентным методом, бесконечные дроби.

**Результаты.** Рассмотрены примеры использования метода голоморфного погружения для двух и трех РQ узловых схем, и показаны недостатки метода голоморфного погружения. Проведено сравнение метода голоморфного погружения с альтернативными методами.

**Выводы.** Аналитический метод голоморфного погружения обладает рядом преимуществ: физической наглядностью, простотой алгоритмической реализации, заключающейся в рекуррентных соотношениях для коэффициентов разложения искомой функции в ряд Тейлора. Разложенная в ряд функция является голоморфной, что позволяет осуществлять ее аналитическое продолжение и получить желаемую точность решения.

### Ключевые слова:

Энергосистема, установившийся процесс, устойчивость, нелинейные уравнения, голоморфное погружение, разложение Паде, сходимость.

### Введение

Для добычи нефти и газа необходимы достаточно мощные источники энергии. В связи с этим возникают вопросы допустимых электроэнергетических режимов работы нефтяных и газовых месторождений. Для того чтобы обеспечить требуемый уровень надежного функционирования процессов нефтедобычи, необходимо обращать внимание на условия эксплуатации энергосистемы. При этом актуальной является задача расчета установившихся режимов (УР) электрической сети, питающей объекты нефтедобычи. Расчеты установившихся режимов имеют большое практическое значение для обеспечения эффективного и безопасного управления режимами работы нефтяных и газовых предприятий, являются важными при проектировании электрических сетей для нефтегазовых предприятий. Наряду с расчетами УР важными являются вопросы исследования устойчивости работы энергосети. Нарушения устойчивости приво-

дят к торможению и отключению электроприемников объектов нефтегазовой отрасли [1–4]. Поэтому работа посвящена расчету УР электрических сетей и вопросам устойчивости функционирования энергосети.

Особенности электроэнергетических систем заключаются в том, что расчет УР производится с помощью нелинейных алгебраических уравнений. Для решения нелинейных уравнений применяют приближенные итерационные методы, позволяющие определить решение системы уравнений с заданной точностью [3–7]. В течение многих десятилетий для решения систем нелинейных алгебраических уравнений использовались такие итерационные методы, как метод Гаусса–Зайделя и метод Ньютона–Рафсона. Метод Гаусса–Зайделя прост в реализации и требует мало памяти ЭВМ, но имеет неудовлетворительную сходимость к решению. Метод Ньютона–Рафсона обладает на порядок лучшей сходимостью (квадратичной), однако при этом в вычислительном отноше-

нии он требует большего объема памяти ЭВМ [3–7]. Существует также множество модифицированных методов, основу которых составляют вышеперечисленные методы. Наибольшее распространение получил метод Ньютона–Рафсона, который применяется в большинстве современных программных комплексов расчета режимов, как отечественных, так и зарубежных.

Хотя итерационные методы широко применяются, у них имеются недостатки. В частности, итерационный процесс зависит от начальных приближений, при этом итерационный процесс может расходиться, а также возможна сходимость к решениям, не имеющим физического смысла. Кроме того, одной из основных проблем является возможное расхождение итерационного процесса, даже если решение существует. Данная проблема часто встречается при расчете режимов, близких к предельным [3–7].

С интенсивным развитием математики последнее время большое внимание уделяется аналитическим методам решения нелинейных задач, в частности для их решения был предложен неитерационный метод голоморфного погружения (ГП), основанный на комплексном анализе. Важной особенностью данного метода является однозначность решения: метод теоретически гарантированно сходится к решению независимо от начального приближения. Первым на возможность аналитического решения обратил внимание испанский исследователь Антонио Триас (Antonio Trias) [8]. Им было предложено использовать метод ГП для решения задачи расчета режимов электроэнергетических систем. Метод обладает наглядностью анализа происходящих процессов, простотой и изяществом.

#### Описание метода голоморфного погружения

Суть метода заключается в том, что в нелинейное уравнение вводится дополнительная комплексная координата – параметр погружения  $\alpha$ , позволяющая преобразовать искомое решение в голоморфную функцию [9]. Искомое решение разлагается в ряд Тейлора по параметру погружения  $\alpha$ . В этой части метод ГП напоминает известный метод разложения решения по малому параметру возмущения [10]. В зависимости от желаемой точности удерживается соответствующее число членов разложения. Поскольку полученное решение является голоморфной функцией, то можно осуществить ее аналитическое продолжение, используя аппроксимацию Паде по параметру  $\alpha$  [11–14]. При этом увеличивается радиус сходимости искомого решения, что позволяет улучшить желаемую точность решения. Для получения искомого решения вместо параметра погружения  $\alpha$  нужно подставить единицу. Простота метода заключается и в том, что нелинейное уравнение заменяется системой линейных рекуррентных уравнений, что легко реализуется алгоритмически. Как показано в [8, 14], важной особенностью метода ГП является однозначность решения: «если решение существует, то это соответствует фактическому состоянию работы энергосистемы, если решения нет, значит, в системе лавина напряжения» [8].

#### Устойчивость двухузловой энергосистемы

Чтобы судить об эффективности работы того или иного метода расчета энергосистемы, необходимо сформулировать соответствующие критерии. В этом разделе рассмотрим вопросы устойчивости на примере энергосистемы с двумя узлами и приведем пример решения задачи аналитическим методом. Метод наглядно показывает границу устойчивости, области устойчивости и неустойчивости. При увеличении мощности нагрузки, при фиксированном значении напряжения шины генератора и сопротивления связи, происходит утяжеление режима работы энергосистемы. Утяжеления можно добиться и увеличением сопротивления связи. В математическом смысле утяжеление режима работы энергосистемы означает приближение решения нелинейного уравнения, описывающего энергосистему, к границе устойчивости. Если решения находятся за границей устойчивости, это значит, что в энергосистеме происходит лавина напряжения и, следовательно, решения не имеют физического смысла, однако в математическом смысле они существуют. Аналитический метод хорош тем, что решения, полученные этим методом, могут быть использованы для верификации альтернативных методов расчета и позволяют явно демонстрировать их преимущества и недостатки. В частности, при приближении к границе устойчивости метод Ньютона–Рафсона решение начинает расходиться. А метод ГП выдает некорректные решения из-за наличия ложных нулей в знаменателе Паде разложения.

В приведенной схеме (рис. 1) величины  $Z$  – сопротивление связи,  $S$  – мощность, потребляемая нагрузкой,  $U_1$  – напряжение на шинах генератора известны, нужно определить  $V$ .

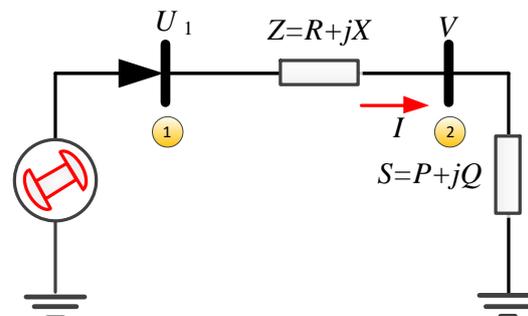


Рис. 1. Двухузловая однолинейная схема электропередачи  
Fig. 1. Two bus one-line transmission system diagram

Запишем уравнение для определения неизвестного напряжения  $V$ , предполагая, что напряжение для  $U_1$  является действительной величиной.

Мощность в узле 2 определяется выражением  $S=I^*V$ . Где \* – означает комплексное сопряжение. Прделав определенную последовательность действий, получим уравнение для определения напряжения в узле 2

$$S = I^*V \rightarrow I = \frac{U_1 - V}{Z} \rightarrow \frac{U_1 - V^*}{Z^*} V = P + jQ.$$

Упростив выражение, можно получить квадратное уравнение относительно неизвестной величины  $V$ :

$$(U_1 - V^*)V = (P + jQ)(R - jX) \rightarrow -V^2 + VU_1 = (PR + QX) + j(QR - PX)$$

или

$$(V_r^2 + V_i^2) - VU_1 = -(PR + QX) - j(QR - PX).$$

И, наконец, получаем, изменяя все знаки и учитывая, что  $V = V_r + jV_i$

$$(V_r^2 + V_i^2) - U_1(V_r + jV_i) = -(PR + QX) - j(QR - PX).$$

Из последнего уравнения получаем систему уравнений, введя новые обозначения

$$\begin{cases} \sigma_r = -(PR + QX), \sigma_i = -(QR - PX) \\ (V_r^2 + V_i^2) - U_1(V_r + jV_i) = \sigma_r + j\sigma_i \end{cases} \rightarrow \begin{cases} V_r^2 + V_i^2 - U_1V_r = \sigma_r \\ V_i = -\frac{\sigma_i}{U_1} \end{cases} \rightarrow V_r^2 - U_1V_r + (\sigma_i^2 - \sigma_r) = 0.$$

Для действительной части искомого напряжения  $V_r$  получаем решение, учитывая, что напряжение генератора в относительных единицах  $U_1=1$ ,

$$V_r^2 - V_r + (\sigma_i^2 - \sigma_r) = 0, \quad D = 1 - 4(\sigma_i^2 - \sigma_r);$$

$$V_r = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{D}{4}} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + \sigma_r - \sigma_i^2}.$$

С учетом его мнимой части можно получить выражение для комплексной величины  $V = V_r + jV_i$

$$V = V_r + jV_i = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + \sigma_r - \sigma_i^2} + j\sigma_i.$$

Очевидно, что множество возможных решений определяется подкоренным выражением

$$\frac{1}{4} + \sigma_r - \sigma_i^2 = 0, \quad \text{или} \quad \sigma_r = \sigma_i^2 - \frac{1}{4}.$$

Графически это можно представить в виде параболы. На левом графике рис. 2 приведены области, разделенные параболой.

Область существующего физического или устойчивого решения – точки, которые находятся в пределах параболы. Область несуществующего действительного решения (нефизические решения), неустойчивые решения, – точки за пределами параболы. Точки, находящиеся на параболе, дают корни, находящиеся на границе устойчивости, – этот случай соответствует двум одинаковым корням. На правом графике приведено соответствие между границей устойчивости и корнями действительной части напряжения  $V_r$ .

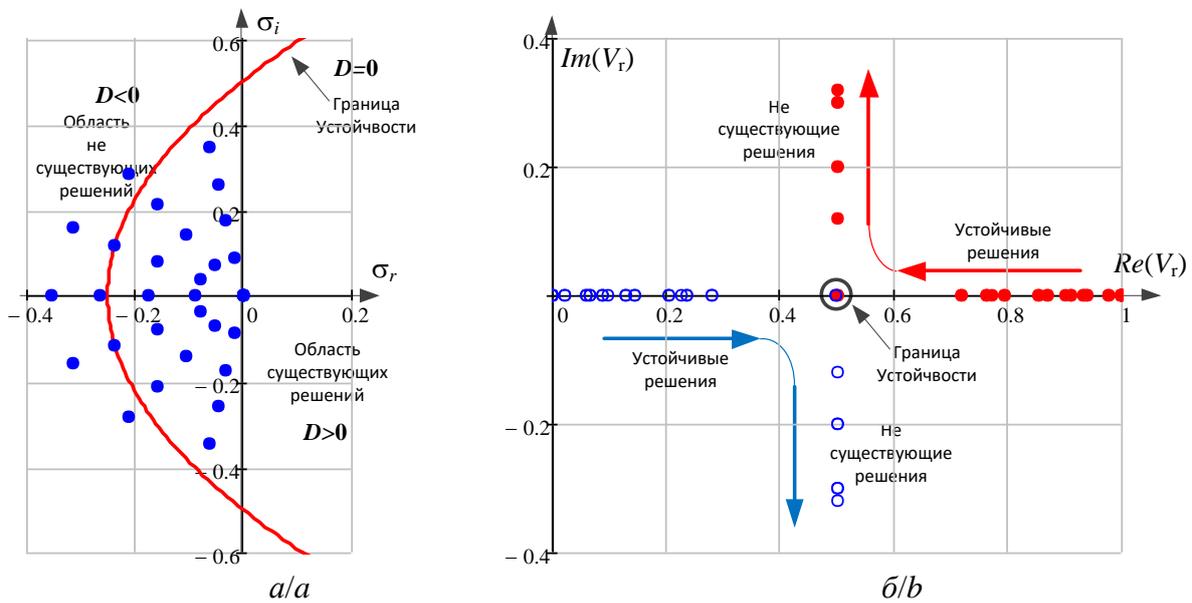


Рис. 2. Картина расположения корней по отношению к границе устойчивости: а) разделения области на устойчивую и неустойчивую подобласти; б) годограф корней действительной части напряжения по отношению к границе устойчивости

Fig. 2. Picture of roots location with respect to the stability boundary: а) division of the region into a stable and unstable subdomains; б) real part of voltage locus with respect to the stability boundary

#### Пример использования метода голоморфного погружения для двухузловой схемы

Приведем пример использования метода ГП для двухузловой схемы, представленной на рис. 1, в которой требуется определить напряжения шины  $V$  с

нагрузкой, потребляющей мощность  $S = P + jQ$ , при условии, что напряжение узла генератора известно –  $U_1 = 1$ .

Запишем полную мощность для нагрузки через ток и искомое напряжение и приведем решение методом голоморфного погружения.

$$S = I^*V \rightarrow I = \frac{U_1 - V}{Z} \rightarrow \frac{U_1 - V}{Z} = \frac{S^*}{V^*};$$

$$V = U_1 - \frac{S^*Z}{V^*}.$$

Учитывая, что напряжение генератора в относительных единицах  $U_1=1$ , получаем

$$V = 1 + \frac{\sigma}{V^*}, \quad \sigma_r = -(PR + QX), \quad \sigma_i = -(QR - PX).$$

Осуществим голоморфное погружение уравнения по параметру  $\alpha$

$$V(\alpha) = 1 + \frac{\alpha\sigma}{V^*(\alpha)}. \quad (1)$$

Будем искать решения в виде разложения в ряд Тейлора

$$V(\alpha) = 1 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + c_3\alpha^3 + c_4\alpha^4 + \dots$$

$$\frac{1}{V(\alpha)} = 1 + d_1\alpha + d_2\alpha^2 + d_3\alpha^3 + d_4\alpha^4 + \dots \quad (2)$$

Первые коэффициенты разложения определяются из соотношения

$$V(0)/V(0) = 1, \quad d_0 = 1, \quad c_0 = 1.$$

Остальные коэффициенты разложения определяются с помощью разложения Паде [11–14] соотношением типа свертки:

$$d_n = -\sum_{k=0}^{n-1} d_k c_{n-k}, \quad (3)$$

которые получаются приравнованием коэффициентов при равных степенях выражения

$$V(\alpha)/V(\alpha) = 1.$$

В развернутом виде (3) имеет вид

$$\alpha^0 \left\{ \begin{array}{l} d_0 = c_0 = 1 \\ \alpha \left\{ \begin{array}{l} d_1 = -c_1 d_0 = -c_1 \\ \alpha^2 \left\{ \begin{array}{l} d_2 = -(c_1 d_1 + c_2 d_0) = c_1^2 - c_2 \\ \alpha^3 \left\{ \begin{array}{l} d_3 = -(c_1 d_2 + c_2 d_1 + c_3 d_0) = -c_1^3 + 2c_2 c_1 - c_3 \\ \alpha^4 \left\{ \begin{array}{l} d_4 = -(c_1 d_3 + c_2 d_2 + c_3 d_1 + c_4 d_0) \\ \alpha^5 \left\{ \begin{array}{l} d_5 = -(c_1 d_4 + c_2 d_3 + c_3 d_2 + c_4 d_1 + c_5 d_0) \\ \alpha^6 \left\{ \begin{array}{l} d_6 = -(c_1 d_5 + c_2 d_4 + c_3 d_3 + c_4 d_2 + c_5 d_1 + c_6 d_0) \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Учитывая дополнительное выражение, получающееся в результате приравновании коэффициентов при одинаковых степенях в (1)

$$(1 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + c_3\alpha^3 + c_4\alpha^4 + c_5\alpha^5 \dots) =$$

$$= 1 + \alpha\sigma \left(1 + d_1^*\alpha + d_2^*\alpha^2 + d_3^*\alpha^3 + d_4^*\alpha^4 + d_5^*\alpha^5 \dots\right),$$

получаем коэффициенты разложения искомой функции

$$c_1 = \sigma, \quad c_2 = -\sigma\sigma^*, \quad c_3 = \sigma^2\sigma^* + \sigma\sigma^{*2},$$

$$c_4 = -\sigma^3\sigma^* - 3\sigma^2\sigma^{*2} - \sigma\sigma^{*3},$$

$$c_5 = 6\sigma^{*3}\sigma^2 + 6\sigma^{*2}\sigma^3 + \sigma^*\sigma^4 + \sigma\sigma^{*4},$$

$$c_6 = -\sigma\sigma^{*5} - 10\sigma^{*4}\sigma^2 - 20\sigma^{*3}\sigma^3 - 10\sigma^{*2}\sigma^4 - \sigma^*\sigma^5.$$

Представим полученные коэффициенты в ряд Тейлора (2)

$$V(\alpha) = 1 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + c_3\alpha^3 + \dots =$$

$$= 1 + (\sigma\alpha - \sigma\sigma^*)\alpha^2 + (\sigma^2\sigma^* + \sigma\sigma^{*2})\alpha^3 + \dots$$

Для увеличения радиуса сходимости представим последнее выражение в виде разложения Паде, как отношение двух рациональных функций:

$$V(\alpha) = [L/M]_{V(\alpha)} = \frac{A(\alpha)}{B(\alpha)} =$$

$$= \frac{a_0 + a_1\alpha + a_2\alpha^2 + \dots + a_L\alpha^L}{b_0 + b_1\alpha + b_2\alpha^2 + \dots + b_M\alpha^M},$$

числитель  $A(\alpha)$  и знаменатель  $B(\alpha)$  которого полиномы степени  $L$  и  $M$  соответственно. Для степеней полиномов выполняется соотношение  $L+M=N$ . Здесь  $N$  – степень исходного полинома  $V(\alpha)$ . По условию теоремы Штала [15, 16], наилучшая сходимость обеспечивается, если степени полиномов числителя и знаменателя одинаковы, то есть  $L=M$ . Такой вид разложения Паде называется диагональным. Преобразуем исходное выражение в произведение

$$V(\alpha)B(\alpha) = A(\alpha)$$

$$(c_0 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + \dots + c_{M+L}\alpha^{M+L}) \times$$

$$\times (b_0 + b_1\alpha + b_2\alpha^2 + \dots + b_M\alpha^M) =$$

$$= a_0 + a_1\alpha + a_2\alpha^2 + \dots + a_L\alpha^L$$

и, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях, получаем различные представления диагонального разложения Паде

$$[2/2]_{V(\alpha)} = \frac{1 + (2\sigma + 2\sigma^*)\alpha + (\sigma^2 + \sigma\sigma^* + \sigma^{*2})\alpha^2}{1 + (\sigma + 2\sigma^*)\alpha + \sigma^{*2}\alpha^2},$$

$$[3/3]_{V(\alpha)} = \frac{\left[ \begin{array}{l} 1 + (3\sigma + 3\sigma^*)\alpha + \\ + (\sigma^2 + (\sigma + \sigma^*)(2\sigma + 2\sigma^*) + \sigma^{*2})\alpha^2 + \\ + (\sigma^2 + \sigma^{*2})(\sigma + \sigma^*)\alpha^3 \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} 1 + (2\sigma + 3\sigma^*)\alpha + \\ + [3\sigma^{*2} + 2\sigma\sigma^* + \sigma^2]\alpha^2 + \sigma^{*3}\alpha^3 \end{array} \right]},$$

$$[4/4]_{V(\alpha)} = \frac{\left[ \begin{array}{l} 1 + (4\sigma + 4\sigma^*)\alpha + (6\sigma^2 + 6\sigma\sigma^* + 6\sigma^{*2})\alpha^2 + \\ + (4\sigma^3 + 6\sigma^2\sigma^* + 6\sigma\sigma^{*2} + 4\sigma^{*3})\alpha^3 + \\ + (\sigma^4 + \sigma^3\sigma^* + \sigma^2\sigma^{*2} + \sigma\sigma^{*3} + \sigma^{*4})\alpha^4 \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} 1 + (3\sigma + 4\sigma^*)\alpha + (3\sigma^2 + 9\sigma\sigma^* + 6\sigma^{*2})\alpha^2 + \\ + (\sigma^3 + 2\sigma^2\sigma^* + 3\sigma\sigma^{*2} + 4\sigma^{*3})\alpha^3 + \sigma^{*4}\alpha^4 \end{array} \right]}.$$

Приведем числовые значения коэффициентов разложения Паде искомого напряжения  $V$  для схемы рис. 3, если заданы условия в относительных единицах:

$$Z = R + jX = 0,1 + j0,2,$$

$$S = P + jQ = 0,7 + j0,26, U_1 = 1;$$

$$\sigma_r = -(RP + XQ) = -0,122, \sigma_i = -(RQ - XP) = 0,114.$$

Подставив в разложение Паде вместо  $\alpha$  единицу, получим значения искомого напряжения

$$[2/2]_{V(\alpha)} = \frac{1 - 0,488\alpha + 0,031656\alpha^2}{1 + (0,366 - j0,114)\alpha + (0,001888 - j0,027816)\alpha^2},$$

$$[2,2]_{V(1)} = 0,84721e^{-j7,71845};$$

$$[3/3]_{V(\alpha)} = \frac{1 - 0,732\alpha + 0,122848\alpha^2 + 0,000921344\alpha^3}{1 - (0,61 - j0,114)\alpha + (0,063312 - j0,055632)\alpha^2 + (0,002940688 + j0,003608784)\alpha^3},$$

$$[3,3]_{V(1)} = 0,84685e^{-j7,73564};$$

$$[4/4]_{V(\alpha)} = \frac{1 - 0,976\alpha + 0,273576\alpha^2 + 0,017290816\alpha^3 - 0,000657761344\alpha^4}{1 - (0,854 - j0,114)\alpha + (0,184272 - j0,083448)\alpha^2 + (0,00230336 - j0,014004672)\alpha^3 - (0,000770165312 + j0,000105033216)\alpha^4},$$

$$[4,4]_{V(1)} = 0,84683e^{-j7,73657}.$$

Следует заметить, что различные приближения Паде можно получить, представляя уравнение (1) в виде бесконечной дроби, последовательно подставляя выражение  $V(\alpha)$  в себя. Такое представление решения называется представлением Висковатого:

$$V(\alpha) = 1 + \frac{\alpha\sigma}{V^*(\alpha)} = 1 + \frac{\alpha\sigma}{1 + \frac{\alpha\sigma}{1 + \frac{\alpha\sigma}{1 + \frac{\alpha\sigma}{1 + \frac{\alpha\sigma}{1 + \dots}}}}}$$

В частности, обрывая бесконечную дробь на 4-й степени, после упрощения можно получить представление Паде  $[2/2]_{V(\alpha)}$

$$V(\alpha) = 1 + \frac{\alpha\sigma}{1 + \frac{\alpha\sigma}{1 + \frac{\alpha\sigma}{1 + \alpha\sigma}}} = \frac{1 + (2\sigma + \sigma^*)\alpha + (\sigma^2 + \sigma\sigma^* + \sigma^{*2})\alpha^2}{1 + (\sigma + 2\sigma^*)\alpha + \sigma^{*2}\alpha^2}.$$

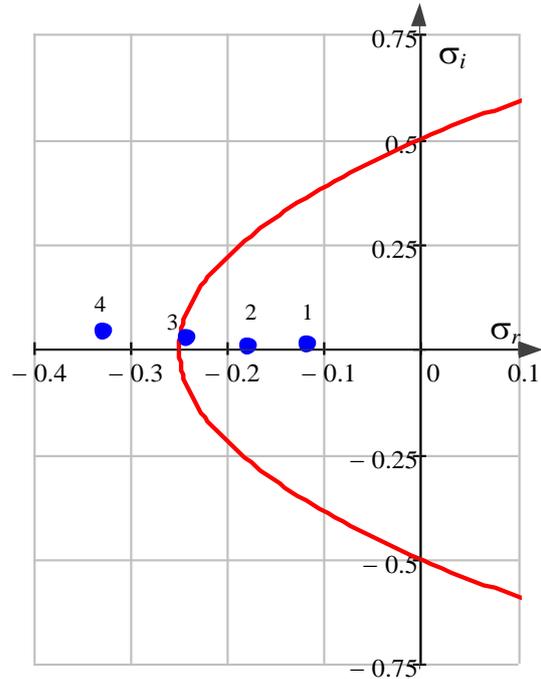


Рис. 3. Пример расположения точек из табл. 1 относительно границы устойчивости

Fig. 3. Example of arrangement of points from table 1 relative to the stability boundary

#### Сравнение результатов методов

Сведем в табл. 1 все рассчитанные значения искомого  $V$  напряжения при различном разложении Паде, методом Ньютона–Рафсона и аналитическим методом.

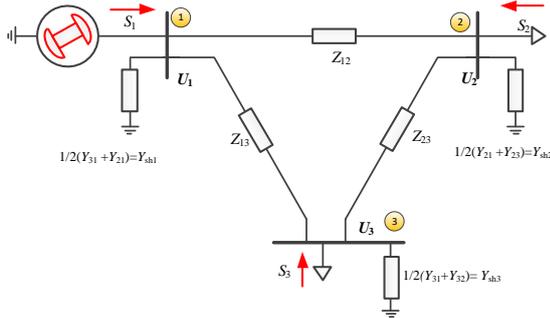
Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов степенных рядов

Table 1. Results of calculation of power series coefficients

Случай/Case $Z=0,1+j0,2$	Нагрузка/Load $P+jQ$ о.е.	$V= V e^{j\varphi}$	$V=[3/3]$	$V=[4/4]$	$V=[6/6]$	V-Ньютон–Рафсон Newton–Raphson	Точное значение Exact value
1	0,7+j0,26	$ V $	0,84685	0,84683	0,84683	0,8495	0,8495
		$\varphi$	-7,73564	-7,73657	-7,73662	-7,73662	-7,73662
2	0,8+j0,5	$ V $	0,7492	0,7488	0,7487	0,7487	0,7487
		$\varphi$	-8,4326	-8,446	-8,448	-8,448	-8,448
Граница устойчивости Stability boundary		$ V $	0,4584	0,2955	0,7712	Расходится Diverges	0,5002
3	1,2+j0,624	$\varphi$	-20,3427	-25,9667	-9,0324		-1,7254
Нефизические решения Non-physical solutions		$ V $	0,835	0,4069	0,7237	Расходится Diverges	0,7524
4	1,5+j0,9	$\varphi$	-5,8181	-19,853	-9,6968		-48,3552

**Пример использования метода голоморфного погружения для трехузловой схемы**

Приведем пример использования метода ГП для трехузловой схемы (рис. 4). В представленной схеме узел 1 – балансирующий узел, узлы 2 и 3 – узлы PQ-типа. Мощность нагрузок равна  $S_2=50+j15\text{MB}\cdot\text{A}$  и  $S_3=45+j25\text{MB}\cdot\text{A}$ . Сопротивления ветвей равны  $Z_{12}=0,03+j0,13$  о.е.,  $Z_{13}=0,01+j0,08$  о.е.,  $Z_{23}=0,05+j0,2$  о.е. Проводимости на землю  $Y_{c12}=Y_{c13}=Y_{c23}=j0,01$  о.е. Расчет будем вести в относительных единицах, считая, что базисная мощность  $S_B=100\text{MB}\cdot\text{A}$ .



**Рис. 4.** Трехузловая однолинейная схема электропередачи  
**Fig. 4.** Three bus one-line transmission system diagram

Запишем общее узловое уравнение в форме баланса токов для узла PQ-типа:

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j = \frac{S_i^*}{U_i^*}, \quad (4)$$

где  $Y_{ij}$  – элементы матрицы узловых проводимостей;  $S_i=S_{tr}-S_{ni}$  – результирующая комплексная мощность, входящая в  $i$ -й узел;  $U_i$  – напряжение узла  $i$ . Левую часть равенства (4) можно представить в следующем виде [17–19]:

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j = \sum_{j=1}^n Y_{ij\ tr} U_j + Y_{i\ sh} U_i, \quad (5)$$

где  $Y_{i\ sh}$  – суммарная проводимость на землю узла  $i$ ;  $Y_{ij\ tr}$  – элементы матрицы узловых проводимостей без учета проводимостей на землю в диагональных элементах. Переносим слагаемое с проводимостями на землю в выражении (5), в правую часть равенства и осуществляем голоморфное погружение уравнения в комплексную плоскость путем встраивания комплексного параметра  $\alpha$ . В результате получается следующее выражение [17–19]:

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij\ tr} U_j(\alpha) = \frac{\alpha S_i^*}{U_i^*(\alpha)} - \alpha Y_{i\ sh} U_i(\alpha). \quad (6)$$

Так как теперь напряжения являются голоморфными функциями, зависящими от комплексной переменной  $\alpha$ , их можно разложить в ряд Тейлора

$$U_j(\alpha) = U_j[0] + U_j[1]\alpha + U_j[2]\alpha^2 + \dots + U_j[n]\alpha^n, \quad (7)$$

$$U_j^*(\alpha^*) = U_j^*[0] + U_j^*[1]\alpha + U_j^*[2]\alpha^2 + \dots + U_j^*[n]\alpha^n. \quad (8)$$

Подставим (7) и (8) в равенство (6), получим следующее выражение

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij\ tr} (U_j[0] + U_j[1]\alpha + U_j[2]\alpha^2 + \dots + U_j[n]\alpha^n) = \frac{\alpha S_i^*}{U_i^*[0] + U_i^*[1]\alpha + U_i^*[2]\alpha^2 + \dots + U_i^*[n]\alpha^n} - \alpha Y_{i\ sh} (U_i[0] + U_i[1]\alpha + U_i[2]\alpha^2 + \dots + U_i[n]\alpha^n). \quad (9)$$

Задача сводится к нахождению коэффициентов ряда, удовлетворяющих уравнению (6). Для решения задачи введем функцию  $W^*(\alpha^*)$  обратную  $U_i^*(\alpha^*)$ , которую также можно разложить в степенной ряд:

$$W^*(\alpha^*) = \frac{1}{U^*(\alpha^*)} = W^*[0] + W^*[1]\alpha + W^*[2]\alpha^2 + \dots + W^*[n]\alpha^n. \quad (10)$$

Подставим (10) в (9) и получим

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij\ tr} (U_j[0] + U_j[1]\alpha + U_j[2]\alpha^2 + \dots + U_j[n]\alpha^n) = \alpha S_i^* (W_i^*[0] + W_i^*[1]\alpha + W_i^*[2]\alpha^2 + \dots + W_i^*[n]\alpha^n) - \alpha Y_{i\ sh} (U_i[0] + U_i[1]\alpha + U_i[2]\alpha^2 + \dots + U_i[n]\alpha^n). \quad (11)$$

Для того чтобы определить неизвестные коэффициенты функции  $W(\alpha)$ , воспользуемся равенством  $W^*(\alpha^*)U^*(\alpha^*)=1$  или  $W(\alpha)U(\alpha)=1$ . Распишем функции, входящие в данное равенство

$$(W[0] + W[1]\alpha + W[2]\alpha^2 + \dots + W[n]\alpha^n) \times (U[0] + U[1]\alpha + U[2]\alpha^2 + \dots + U[n]\alpha^n) = 1. \quad (12)$$

В правой части равенства (12) открываем скобки и, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях с обеих сторон уравнения, получаем

$$\begin{aligned} W[0] \cdot U[0] &= 1 \Rightarrow \\ \Rightarrow W[0] &= \frac{1}{U[0]}; \\ W[0] \cdot U[1] + W[1] \cdot U[0] &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow W[1] &= -\frac{W[0] \cdot U[1]}{U[0]}; \\ W[0] \cdot U[2] + W[1] \cdot U[1] + W[2] \cdot U[0] &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow W[2] &= -\frac{W[0] \cdot U[2] + W[1] \cdot U[1]}{U[0]}. \end{aligned}$$

Анализируя полученные уравнения, можно записать общее выражение для вычисления  $n$ -го коэффициента ряда функции  $W(\alpha)$  для каждого  $n \geq 1$ :

$$\dot{W}[n] = -\frac{\sum_{k=0}^{n-1} \dot{W}[k] \dot{U}[n-k]}{\dot{U}[0]}, \quad n \geq 1. \quad (13)$$

Таким образом, для узла PQ-типа неизвестный  $n$ -й коэффициент функции напряжения  $U(\alpha)$  может быть найден по известным  $(n-1)$ -м коэффициентам по выражению

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij\ tr} U_j[n] = S_i^* W_i^*[n-1] - Y_{i\ sh} U_i[n-1]. \quad (14)$$

Выражение (11), (14) можно представить в матричном виде

$$[\mathbf{Y}_{ij \text{ tr}}]\mathbf{U}[\mathbf{n}] = \mathbf{S}^* \mathbf{W}^*[\mathbf{n}-1] - \mathbf{Y}_{sh} \mathbf{U}[\mathbf{n}-1]. \quad (15)$$

Здесь  $[\mathbf{Y}_{ij \text{ tr}}]$  – матрица узловых проводимостей без учета проводимостей на землю в диагональных элементах и с учетом балансирующего узла;  $\mathbf{U}[\mathbf{n}]$  – вектор-столбец  $n$ -х коэффициентов степенных функций  $U_i(\alpha)$  напряжений в узлах;  $\mathbf{S}^*$  – вектор-столбец задающих мощностей в узлах;  $\mathbf{W}^*[\mathbf{n}-1]$  – вектор-столбец  $(n-1)$ -х коэффициентов степенных функций  $W_i(\alpha)$ , обратных функциям напряжений в узлах;  $\mathbf{Y}_{sh}$  – вектор-столбец суммарных проводимостей на землю.

Для удобства уравнение (15) представим в виде

$$[\mathbf{Y}_{ij \text{ tr}}]\mathbf{U}[\mathbf{n}] = \mathbf{I}[\mathbf{n}-1],$$

где  $\mathbf{I}[\mathbf{n}-1] = \mathbf{S}^* \mathbf{W}^*[\mathbf{n}-1] - \mathbf{Y}_{sh} \mathbf{U}[\mathbf{n}-1]$  – вектор-столбец  $(n-1)$ -х коэффициентов задающих токов в узлах.

Формируем матрицу узловых проводимостей

$$Y = \begin{pmatrix} 3,224 - j19,601 & -1,685 + j7,303 & -1,538 + j12,308 \\ -1,685 + j7,303 & 2,862 - j11,999 & -1,176 + j4,706 \\ -1,538 + j12,308 & -1,176 + j4,706 & 2,715 - j17,004 \end{pmatrix}.$$

Рассчитываем матрицу задающих мощностей в узлах

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ -0,5 - j0,15 \\ -0,45 - j0,25 \end{pmatrix}.$$

Рассчитываем матрицу суммарных проводимостей на землю

$$Y_{sh} = \begin{pmatrix} j0,01 \\ j0,01 \\ j0,01 \end{pmatrix}.$$

Формируем матрицу узловых проводимостей без учета проводимостей на землю в диагональных элементах с учетом того, что узел 1 является балансирующим

$$Y_r = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1,685 + j7,303 & 2,862 - j12,009 & -1,176 + j4,706 \\ -1,538 + j12,308 & -1,176 + j4,706 & 2,715 - j17,014 \end{pmatrix}.$$

Начальное значение (0-й коэффициент) напряжений в узлах принимаем равным единице

$$U[0] = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда 0-е коэффициенты функций  $W_i(\alpha)$ , обратных функциям напряжений в узлах,

$$W[0] = \frac{1}{U[0]} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Находим вектор-столбец задающих токов в узлах при  $n=0$

$$I[0] = \begin{pmatrix} 0 \\ -0,5 + j0,14 \\ -0,45 + j0,24 \end{pmatrix}.$$

Рассчитаем вектор-столбец 1-х коэффициентов степенных функций напряжений  $U(\alpha)$  в узлах

$$U[1] = [\mathbf{Y}_{ij \text{ tr}}]^{-1} \mathbf{I}[0] = \begin{pmatrix} 0 \\ -0,0301 - j0,0522 \\ -0,025 - j0,039 \end{pmatrix}.$$

Используя формулу (10), рассчитываем матрицу 1-х коэффициентов функций  $W(\alpha)$ , обратных функциям напряжений  $U(\alpha)$  в узлах

$$W[1] = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,03 + j0,052 \\ 0,025 + j0,039 \end{pmatrix}.$$

Аналогично рассчитываем следующие коэффициенты, используя (13). Достаточная точность  $\varepsilon=10^{-5}$  достигнута после расчета 4-го коэффициента степенного ряда. Результаты расчета представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета коэффициентов степенных рядов напряжений. Напряжения приведены в относительных единицах

**Table 2.** Results of calculation of voltage power series coefficients. Voltages are given in relative units

n	U <sub>1</sub> [n]	U <sub>2</sub> [n]	U <sub>3</sub> [n]
0	1	1	1
1	0	-0,03-j0,052	-0,025-j0,039
2	0	-3,516·10 <sup>-3</sup> -j3,378·10 <sup>-5</sup>	-2,381·10 <sup>-3</sup> -j1,496·10 <sup>-5</sup>
3	0	-2,07·10 <sup>-4</sup> -j4,097·10 <sup>-6</sup>	-1,325·10 <sup>-4</sup> -j2,966·10 <sup>-6</sup>
4	0	-2,324·10 <sup>-5</sup> -j3,866·10 <sup>-7</sup>	-1,42·10 <sup>-5</sup> -j3,562·10 <sup>-7</sup>

Таким образом, функции напряжений во втором и третьем узлах, представленные в виде степенного ряда, имеют следующий вид

$$U_2(\alpha) = 1 + (-0,03 - j0,052)\alpha + (-3,516 \cdot 10^{-3} - j3,378 \cdot 10^{-5})\alpha^2 + (-2,07 \cdot 10^{-4} + j4,097 \cdot 10^{-6})\alpha^3 + (-2,324 \cdot 10^{-5} + j3,866 \cdot 10^{-7})\alpha^4;$$

$$U_3(\alpha) = 1 + (-0,025 + j0,039)\alpha + (-2,381 \cdot 10^{-3} + j1,496 \cdot 10^{-5})\alpha^2 + (-1,325 \cdot 10^{-4} - j2,966 \cdot 10^{-6})\alpha^3 + (-1,42 \cdot 10^{-5} - j3,562 \cdot 10^{-7})\alpha^4.$$

Данные функции могут быть представлены в виде аппроксимантов Паде порядка [2/2]

$$U_2(\alpha) = \frac{1 + (-0,118 - j0,0031)\alpha + (0,000172 + j0,000212)\alpha^2}{1 + (-0,0879 + j0,0491)\alpha + (-0,00152 - j0,00287)\alpha^2};$$

$$U_3(\alpha) = \frac{1 + (-0,109 + j0,0052)\alpha + (0,000259 - j0,00031)\alpha^2}{1 + (-0,0844 + j0,0442)\alpha + (-0,00119 - j0,00251)\alpha^2}.$$

Подставляя значение  $\alpha=1$ , получаем искомое решение

$$U_2(1) = 0,9662 + j0,0522 = 0,9676e^{-j3,094^\circ} \text{ о.е.},$$

$$U_3(1) = 0,9724 + j0,039 = 0,9732e^{-j2,294^\circ} \text{ о.е.}$$

Результаты расчета совпадают с результатами расчета методом Ньютона–Рафсона, полученными в ПК «RastrWin3» и MATPOWER (табл. 3).

**Таблица 3.** Сравнение результатов расчета. Напряжения приведены в относительных единицах.  
 $U=Ve^{j\delta}$

**Table 3.** Comparison of calculation results. Voltages are given in relative units.  $U=Ve^{j\delta}$

№ узла Bus no.	Метод голоморфного погружения Holomorphic embedding method		RastrWin3		MATPOWER	
	V	$\delta$ , градусы degree	V	$\delta$ , градусы degree	V	$\delta$ , градусы degree
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9676	-3,0936	0,9676	-3,0936	0,9676	-3,0936
3	0,9732	-2,2942	0,9732	-2,2942	0,9732	-2,2942

### Заключение

В работе представлен аналитический метод ГП, обладающий рядом преимуществ перед известным методом Ньютона–Рафсона:

- физической наглядностью;
- простотой алгоритмической реализации, заключающейся в рекуррентных соотношениях для коэффициентов разложения искомой функции в ряд Тейлора;
- разложенная в ряд функция является голоморфной, что позволяет осуществлять ее аналитическое продолжение, аналитическое продолжение позволяет получить желаемую точность.

Авторы работы привели примеры использования метода ГП для двух- и трехузловых схем.

К недостаткам метода следует отнести:

- неудовлетворительную работу при приближении к границе устойчивости за счет появления ложных нулей знаменателя в разложении Паде искомого решения. При приближении к границе устойчивости алгебраические уравнения для определения коэффициентов разложения решения становятся

плохо обусловленными. Поэтому следует применять методы регуляризации решения.

В последнее время появились работы, позволяющие получать аналитические решения на границе устойчивости [20]. Это происходит за счет дополнительного пересчета решения, с новыми стартовыми значениями, форсирующего процесс схождения к решению и позволяющего осуществлять аналитическое продолжение вдоль особым образом выбранного выреза в комплексной плоскости.

- отсутствие четкого критерия приближения решения к границе устойчивости.

Существуют работы, в которых предлагается формировать критерий приближения к границе устойчивости на основе расположения нулей и полюсов разложения Паде на корневом годографе [21, 22]. Корни разложения решения в ряд Тейлора располагаются по окружности, радиус которой определяется критерием Каши–Адамара.

$$\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} |c_n|^{1/n} \quad V(\alpha) = 1 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + \dots + c_n\alpha^n.$$

По отклонению корней и полюсов разложения Паде от действительной оси можно судить о наличии ложных корней в разложении, а следовательно, и о сходимости решения. Если решения приближаются к границе устойчивости, то корни приближаются к окружности радиуса, определяемого критерием Фабри с внутренней стороны [21, 22]

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|c_n|}{|c_{n+1}|}, \quad V(\alpha) = 1 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + \dots + c_n\alpha^n.$$

Таким образом, приближение корней к окружности радиуса  $R$  может служить индикатором приближения решения к границе устойчивости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые технологии и современное оборудование в энергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 478 с.
2. Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 173–180.
3. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.
4. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах / Б.И. Аюев, В.В. Давыдов, П.М. Ерохин, В.Г. Неуймин. – М.: Изд-во «Флинта», 2008. – 256 с.
5. Тарасов В.И. Теоретические основы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, 2002. – 344 с.
6. Жуков Л.А., Стратан И.П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: методы расчетов. – М.: Энергия, 1979. – 416 с.
7. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
8. Trias A. Fundamentals of the holomorphic embedding load-flow method. URL: <https://arxiv.org/abs/1509.02421> (дата обращения: 15.01.2020).
9. Шабат Б.В. Введение в комплексный анализ. Ч. 1: Функции одного переменного. – М.: Наука, 2004. – 336 с.
10. Murduck J.A. Perturbation theory and methods. – New York: John Wiley & Sons, Inc, 1991. – 509 p.
11. Суетин С.П. Аппроксимации Паде и эффективное аналитическое продолжение степенного ряда // УМН. – 2002. – Т. 57. – Вып. 1 (343). – С. 45–142.
12. Бейкер Дж. мл., Грейвс-Моррис П. Аппроксимация Паде. – М.: Мир, 1986. – 502 с.
13. Никишин Е.М., Сорокин В.Н. Рациональные аппроксимации и ортогональность. – М.: Наука, 1988. – 258 с.
14. Trias A. The holomorphic embedding load flow method // Power and Energy Society General Meeting. – San Diego, July 2012. – P. 1–8.
15. Stahl H. Orthogonal polynomials with complex-valued function. I, II // Constr. Approx. – 1986. – V. 2. – P. 225–251.
16. Stahl H. Domains associated with an analytic function. I // Complex Variables Theory Appl. – 1985. – V. 4 (4). – P. 311–324.
17. Online voltage stability assessment for load areas based on the holomorphic embedding method / Chengxi Liu, Bin Wang, Fengkai Hu, Kai Sun, Claus Leth Bak // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – V. 33. – № 4. – P. 3720–3734.
18. Chiang H., Wang T., Sheng H. A novel fast and flexible holomorphic embedding power flow method // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – V. 33. – № 3. – P. 2551–2562.
19. Feng Y., Tylavsky D. A holomorphic embedding approach for finding the Type-1 power-flow solutions // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2018. – V. 102. – P. 179–188.
20. Rao S.D., Tylavsky D.J., Feng Y. Estimating the saddle-node bifurcation point of static power systems using the holomorphic embedding method // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – V. 84. – P. 1–12.

21. Suetin S.P., Baghsorkhi S.S. Embedding AC Power Flow in the Complex Plane. Part I: Modelling and Mathematical Foundation. – 2016. – 13 p. URL: <https://arxiv.org/abs/1604.03425> (дата обращения 15.01.2020).
22. Suetin S.P., Baghsorkhi S.S. Embedding AC Power Flow in the Complex Plane. Part II: A Reliable Framework for Voltage Collapse Analysis. – 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1604.03425> (дата обращения 15.01.2020).

*Поступила: 24.01.2020 г.*

#### **Информация об авторах**

**Исаев Ю.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кабалин Д.А.**, аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.314.58:681.5.015

## HOLOMORPHIC EMBEDDING AS ANALYTICAL TECHNIQUE FOR CALCULATING ELECTRIC GRIDS OF OIL AND GAS DEPOSITS

Yusup N. Isaev<sup>1</sup>,  
isaev\_yusup@mail.ru

Dmitry A. Kabalin<sup>1</sup>,  
mitya.kabalin@gmail.com

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

*In order to ensure the required level of reliable operation of oil production, it is necessary to pay attention to the operating conditions of the power system. This is important if we take into account that for oil and gas extraction the powerful sources of energy that significantly affect the mode of operation of the power grid are needed. In this case, the urgent task is to calculate the steady-state modes of the oil production electric network. The calculations of the established modes are of great practical importance to ensure efficient and safe management of the operating modes of oil and gas enterprises, and are important in the design of electrical networks for oil and gas enterprises. However, the application of classical iterative methods for calculating steady-state regimes, such as the Gauss–Seidel and Newton–Raphson methods, does not always allow finding the right solution, since the convergence of these methods depends on initial conditions. The method is based on the Padé approximation and the perturbation method. The paper demonstrates the disadvantages and the advantages of the proposed method over the well-known Gauss–Seidel and Newton–Raphson iteration method and the examples of solving the problems of electric power chains. The problems of sustainability are considered.*

**The aim** of the research is to apply the analytical method of holomorphic embedding to calculate two and three nodal energy schemes; compare the capabilities of the method with other alternative methods; investigate the limitations of the holomorphic embedding method and show the area of its work.

**Methods:** Taylor expansion, analytic continuation, solving algebraic equations by the recurrent method, infinite fractions.

**Results.** The authors gave the examples of using the holomorphic embedding method for two and three PQ nodal circuits, and showed the shortcomings of the holomorphic embedding method. The holomorphic embedding method is compared with alternative methods.

**Conclusions.** The analytical method of holomorphic embedding has several advantages: physical visibility; the simplicity of the algorithmic implementation consisting in recurrence relations for the coefficients of the expansion of the desired function in a Taylor series. The function laid out in a series is holomorphic, which allows analytic continuation of a function to obtain the desired accuracy of solution.

### Key words:

Energy system, steady process, stability, nonlinear equations, holomorphic e, Padé decomposition, convergence.

### REFERENCES

- Belousenko I.V., Schwartz G.R., Great S.N., Ershov M.S. Yari-zov A.D. *Novye tekhnologii i sovremennoe oborudovanie v energetike neftegazovoy promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in the energy sector of the oil and gas industry]. Moscow, Nedra-Biznestsentra Publ., 2007. 478 p.
- Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Methodology of modeling regionally isolated electrotechnical complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 173–180. In Rus.
- Idelchik V.I. *Raschety ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh sistem* [Calculations of steady-state modes of electric systems]. Moscow, Energia Publ., 1977. 192 p.
- Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M., Neuiymin V.G. *Vychislitelnye modeli potokoraspredeleniya v elektricheskikh sistemakh* [Power flow computing models in power systems]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 256 p.
- Tarasov V.I. *Teoreticheskie osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Theoretical bases of analysis of steady-state modes of electric power systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2002. 344 p.
- Zhukov L.A., Stratan I.P. *Ustanovivshiesya rezhimy slozhnykh elektricheskikh setey i sistem: metody raschetov* [Steady-state modes of complex electrical networks and systems: methods of calculations]. Moscow, Energia Publ., 1979. 416 p.
- Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. *Raschety ustoychivosti i protivovariyynoy avtomatiki v energosistemakh* [Calculation of stability and emergency automation in power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p.
- Trias A. *Fundamentals of the holomorphic embedding load-flow method*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1509.02421> (accessed 15 January 2020).
- Shabat B.V. *Vvedenie v kompleksny analiz. Ch. 1: Funktsii odnogo peremennogo* [Introduction to complex analysis. P. 1: Functions of one variable]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 336 p.
- Murduck J.A. *Perturbation theory and methods*. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1991. 509 p.
- Suetin S.P. Padé approximants and the effective analytic continuation of a power series. *Russian Math. Surveys*, 2002, vol. 57, no. 1, pp. 45–142.
- Baker G.A., Graves-Morris P. *Approksimatsia Pade* [Padé approximants]. Moscow, Mir Publ., 1986. 502 p.
- Nikishin E.M., Sorokin V.N. *Ratsionalnye approksimatsii i ortogonalnost* [Rational approximations and orthogonality]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 258 p.
- Trias A. The holomorphic embedding load flow method. *Power and Energy Society General Meeting*. San Diego, July 2012. pp. 1–8.
- Stahl H. Orthogonal polynomials with complex-valued function. I, II. *Constr. Approx.*, 1986, vol. 2, pp. 225–251.
- Stahl H. Domains associated with an analytic function. I. *Complex Variables Theory Appl.*, 1985, vol. 4 (4), pp. 311–324.
- Chengxi Liu, Bin Wang, Fengkai Hu, Kai Sun, Claus Leth Bak. Online voltage stability assessment for load areas based on the holomorphic embedding method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 3720–3734.
- Chiang H., Wang T., Sheng H. A novel fast and flexible holomorphic embedding power flow method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 2551–2562.
- Feng Y., Tylavsky D. A holomorphic embedding approach for finding the Type-1 power-flow solutions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 102, pp. 179–188.
- Rao S.D., Tylavsky D.J., Feng Y. Estimating the saddle-node bifurcation point of static power systems using the holomorphic

- embedding method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 84, pp. 1–12.
21. Suetin S.P., Baghsorkhi S.S. *Embedding AC Power Flow in the Complex Plane*. P. I: Modelling and Mathematical Foundation, 2016. 13 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/1604.03425> (accessed 15 January 2020).
22. Suetin S.P., Baghsorkhi S.S. *Embedding AC Power Flow in the Complex Plane*. P. II: A Reliable Framework for Voltage Collapse Analysis. 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1604.03425> (accessed 15 January 2020).

*Received: 24 January 2020.*

#### **Information about the authors**

**Yusup N. Isaev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry A. Kabalin**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.136:551.345

## ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВОД ЧЕРЕЗ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Юркевич Николай Викторович<sup>1</sup>,  
YurkevichNV2@ipgg.sbras.ru

Юркевич Наталия Викторовна<sup>1</sup>,  
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Гуреев Вадим Николаевич<sup>1,2</sup>,  
GureyevVN@ipgg.sbras.ru

Мазов Николай Алексеевич<sup>1</sup>,  
MazovNA@ipgg.sbras.ru

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, 630087, ул. Немировича-Данченко, 136.

**Актуальность** работы обусловлена экологическими рисками в связи с техногенным растеплением многолетнемерзлых грунтов в местах складирования отходов горно-добывающих предприятий в условиях Крайнего Севера.

**Цель:** анализ мирового опыта по проблемам деградации мерзлоты, развития фильтрационных каналов в трещиноватых тектонических зонах, влекущих утечки оборотных вод из хвостохранилищ горно-обогатительных предприятий, и поиску технологических решений, направленных на снижение фильтрационного потока и предотвращение экологических проблем.

**Методы:** ретроспективный анализ публикаций, отобранных в результате поиска в отечественных и международных библиографических базах данных, включая реферативный журнал ВИНТИ РАН, Российский индекс научного цитирования и библиографический указатель Scopus компании Elsevier, с 2000 г. по настоящее время.

**Результаты.** Контроль и предотвращение фильтрации вод через плотины хвостохранилищ горно-обогатительных предприятий и прилегающий горный массив в условиях вечной мерзлоты осуществляется преимущественно при помощи мероприятий по управлению температурным режимом грунтов, сооружению противофильтрационных экранов и завес, использования тампонажных технологий. Основные освещенные в литературе методы тампонажа включают использование растворов на основе портландцемента, облегающих добавок (алюмосиликатные микросферы), расширяющего компонента и жидкости затворения (раствор хлористого кальция); тампонажных смесей на основе гипса, бруситового каустического порошка, сернокислого магнезия, торфа. Перспективным направлением в разработке противофильтрационных мероприятий на предприятиях, расположенных в районах Севера и вечной мерзлоты, является использование криогелей, создающих завесу, которая упрочняется при замораживании и оттаивании. Анализ публикаций за период с 2000 г. по настоящее время показал, что несмотря на актуальность проблемы утечек фильтрационных вод на хвостохранилищах горнодобывающих предприятий, отмечается ограниченность опубликованных разработок и недостаток технической литературы по этому направлению.

### Ключевые слова:

Вечная мерзлота, растепление грунтов, гидротехнические сооружения, плотина, дамба, хвостохранилище, обзор.

### Введение

Эксплуатация хвостохранилищ горно-обогатительных предприятий имеет ряд экологических последствий, в том числе в связи с окислением тонкоизмельченных хвостов обогащения руды кислородом воздуха и воды с формированием минерализованных дренажных вод, миграция которых за пределы хранилищ приводит к загрязнению поверхностных и подземных вод региона [1–4]. Кроме того, процессы взаимодействия «вода–хвосты» в условиях Крайнего Севера зачастую приводят к растеплению многолетнемерзлых грунтов, формированию техногенных таликов, утечкам техногенных вод, что в случае наличия разломных зон приводит к развитию фильтрационных каналов.

Целью работы является анализ мирового опыта по техническим особенностям возведения плотин хвостохранилищ в зоне вечной мерзлоты, техническим решениям по контролю и предотвращению фильтра-

ции вод через плотины, проблемам прогнозирования растепления грунтов, надежности защиты плотин от возможных аварий.

Исследование актуально как для инженеров и технологов горнорудной промышленности, так и для специалистов в областях наук о Земле, горного дела и экологии. Высокий интерес к данной проблематике проявляют научные организации и коммерческие компании Российской Федерации, Соединенных Штатов Америки, Канады, а также Китая и стран Средней Азии, высокогорные районы которых имеют схожие с российскими условия низких температур и вечной мерзлоты.

### Материалы и методы

При выполнении настоящей работы использовались источники, отобранные в результате поиска в отечественных и международных библиографических

базах данных, включая реферативный журнал ВИНТИ РАН, Российский индекс научного цитирования и библиографический указатель Scopus компании Elsevier, преимущества которого перед иными базами данных хорошо освещены в работе [5]. Ретроспективный анализ включает публикации за 20-летний период – с 2000 г. по настоящее время. В реферативном журнале ВИНТИ в качестве тематических ограничителей были выбраны направления «Геология», «Геофизика», «Горное дело» и «Охрана окружающей среды»; в базе данных Scopus – рубрика по наукам о Земле – Earth and Planetary Sciences. В качестве запроса использовались следующие термины в различных комбинациях: вечная мерзлота, растепление, деградация мерзлоты, опасные экзогенные геологические процессы, фильтрация через трещиноватые тектонические зоны, оборотные техногенные воды, хвостохранилище, пульпа, дамба, утечки, каналы фильтрации, ликвидация каналов, тампонажные технологии, геотермальный насос, мерзлотоведение, замораживание грунтов, криогель, цементирование трещин, подземные воды. При поиске зарубежных источников использовались соответствующие англоязычные термины.

В итоге для экспертного анализа было отобрано более 60 наиболее пертинентных источников, значительная часть которых российские. Это связано с климатическими условиями вечной мерзлоты и их наибольшей площадью в сравнении с другими странами, что и обусловило особенную актуальность тематики именно для Российской Федерации.

#### **1. Технические особенности возведения плотин хвостохранилищ в зоне вечной мерзлоты**

Значительная часть исследований посвящена проблемам возведения плотин в зоне вечной мерзлоты. Особое значение для гидротехнических сооружений (далее – ГТС) в криолитозоне имеет выбор принципа строительства. Для сохранения вечномерзлых грунтов в естественном состоянии часто проектируются сложные в исполнении и пользовании охлаждающие и замораживающие технологические системы. Например, в работах [6, 7] на примере хвостохранилища «Лебяжье», расположенного на севере Красноярского края, описан способ зенитного намыва ограждающей дамбы, позволивший выявить преимущества и недостатки этого подхода перед традиционным способом создания плотин. Отмечено, что общим недостатком традиционного и зенитного способов складирования хвостов является отсутствие приборов контроля, способных распознавать аварийные ситуации. Чтобы предупредить ситуацию, при которой опорожнение распределительного пульпопровода в случае его внезапной или плановой остановки невозможно, намыв рекомендуется осуществлять короткими пляжами с крутым заложением, что позволяет производить разгрузку пульпопровода через сосредоточенные выпуски. В качестве основных преимуществ зенитного намыва можно выделить: а) снижение материальных и финансовых затрат, б) формирование дамбы устойчивой конструкции,

в) сохранение емкости, г) высокое качество пляжа. Проведенный эксперимент показал высокую экологическую эффективность производства работ, поскольку поступления техногенных вод за пределы хвостохранилища практически не наблюдалось, в связи с чем техногенная нагрузка хвостохранилища на окружающую природную среду снизилась.

Другой пример возведения дамбы хвостохранилища в Красноярском крае [8] включает технологию отсыпки в пляжной зоне кольцевой пульпоулавливающей призмы, позволившей за летний период намыва произвести подъем гребня ограждающей дамбы, создать емкость, достаточную для оборотного водоснабжения и зимнего подледного складирования хвостов, обеспечить естественное промерзание тела дамбы и соответственно фильтрационную и статическую устойчивость ограждающих конструкций, а также повысить экологическую безопасность сооружения. Для ликвидации аварийных утечек техногенных вод из мерзлотной противофильтрационной завесы и обеспечения устойчивости плотины хвостохранилища Надеждинского металлургического завода, расположенного в Свердловской области, была реализована технология создания противофильтрационного экрана из отвальных хвостов на верховом откосе плотины с одновременным введением в действие насосной станции по перехвату фильтрационных потерь из хвостохранилища в нижнем бьефе и введением в действие дренажных скважин. Проведенные мероприятия сопровождались понижением температур грунтов основания, уменьшением границ талых пород и повышением устойчивости сооружения.

Существенное внимание уделяется выбору и обоснованию времени строительства дамб, так как период промерзания, а также температурное поле будут различаться, учитывая время строительства дамбы, теплофизические характеристики и влажность грунтов и размеры плотины. Установлено, что высота дамбы при ее возведении летом не должна превышать 6 м ввиду отсутствия в теплое время года необходимого температурного режима, значимого для фильтрационной и статической устойчивости. В то же время при возведении ГТС зимой в ее основании и теле уже в первый год создается отрицательный температурный режим (не выше  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  в ядре) [9]. Следовательно, рекомендуется уже в первый год формировать ядро плотины в зимнее время, используя метод послойного намораживания грунтов, с тем чтобы создать в теле дамбы устойчивый противофильтрационный экран из мерзлого грунта.

Для строительства гидротехнических сооружений с повышенными противофильтрационными и прочностными характеристиками также рекомендуется одновременное использование строительства плотин «мерзлого» типа и подхода, основанного на водно-тепловой мелиорации [10]. В условиях вечной мерзлоты это обеспечивает ряд преимуществ, включая снижение объемов выполняемых работ при эксплуатации месторождений, отказ от применения буровзрывного рыхления песков, уменьшение землеемкости, снижение трудозатрат на выполнение транспортных

работ и также снижение выбросов вредных веществ. На примере Нюрбинского горно-обогатительного комбината, который находится в Якутии, для регионов распространения многолетнемерзлых грунтов показана эффективность проектирования, строительства и безопасной эксплуатации насыпных низконапорных плотин [11]. Возможности обеспечения устойчивости сооружения путем управления мерзлотно-грунтовыми условиями с помощью специальных технологий строительства и эксплуатации показаны на примере двух разнотипных хвостохранилищ Норильского промышленного района, находящегося на севере Красноярского края [12].

В исследованиях [13, 14] обсуждаются возможные конструктивные и технологические подходы при строительстве накопителей промышленных отходов. Незамерзающая дренажная система таких накопителей позволяет использовать их даже при значительном промерзании внешнего откоса. Конструкция подобного накопителя позволяет регулировать глубину оттаивания, а каскадная схема расположения позволяет исключить фильтрацию из накопителя.

Особое внимание при возведении плотин хвостохранилищ на вечномерзлых грунтах уделяется проблеме улавливания стоков. Например, система улавливания стоков может включать фильтрующую дамбу и трубчатый дренаж, дренажно-пригрузочную призму, расположенную в нижней части дамбы со стороны ее нижней грани, водонепроницаемый экран, размещенный на дренажно-пригрузочной призме, зуб из водонепроницаемого материала, расположенный под дренажно-пригрузочной призмой и соединенный верхней частью с водонепроницаемым экраном, а нижней частью – с зоной вечной мерзлоты, пруд-накопитель, расположенный на расстоянии от зуба не менее удвоенной мощности вечномерзлых пород и выполненный с дном из слоев водонепроницаемого материала с расположенными между ними слоями теплоизоляции [15].

В условиях растепления многолетнемерзлых грунтов береговых примыканий ограждающих дамб, влекущего развитие фильтрационных каналов и утечку оборотных вод, встает вопрос о предотвращении фильтрации вод, которое находит решение в нескольких аспектах. Сюда относятся меры по прогнозированию растепления грунтов, надежности защиты плотин и возможных аварий, мероприятия по поддержанию мерзлоты и по защите от растепления, созданию противофильтрационных (тампонажных, мерзлотных) экранов и завес и применению различного рода инъекций для борьбы с утечками через разломные зоны в местах складирования горнорудной промышленности.

## **2. Технические решения по контролю и предотвращению фильтрации вод через плотины**

### **2.1. Управление температурным режимом грунтов для поддержания мерзлоты и для защиты от растепления**

Ряд исследований посвящен выбору теплоизолирующих материалов, предотвращающих растепление горных пород. Авторами исследования [16] разработана математическая модель, учитывающая теплооб-

менные процессы в карьере, которая дает возможность сделать прогноз по формированию температурного поля в массиве горных пород уступа карьера с учетом конструкции уступа, теплофизических свойств пород, климатических условий, а также геометрических размеров теплоизоляции поверхностей уступа. Полученные в ходе работы результаты демонстрируют перспективность применения разработанного подхода к управлению устойчивостью бортов карьера, который дает возможность в летний сезон снизить фильтрацию и предотвратить растепление бортов карьера атмосферным теплом.

Активное управление температурным режимом грунтов в ограждающих дамбах хвостохранилищ на Севере может быть достигнуто с помощью использования сезоннодействующих охлаждающих устройств различного типа: воздушных с вынужденной конвекцией воздуха, жидкостных с естественной конвекцией хладоносителя-керосина, жидкостных с вынужденной конвекцией хладоносителя и парожидкостных, или двухфазных [17]. При этом противофильтрационные и несущие нагрузки элементы ГТС создаются замораживанием влаги, содержащейся в грунте, до его твердомерзлого состояния. Сохранению пород от растепления может способствовать широко используемая за рубежом надпакерная жидкость на углеводородной основе [18].

Предотвратить растепление мерзлых пород позволяют также системы теплоизолирующих труб. На примере Уренгойской группы месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа показаны возможности применения теплоизолированных конструкций, представляющих собой стальные трубы диаметром от 57 до 1220 мм с теплоизоляцией из пенополиуретана в гидрозащитной оболочке по типу «труба в трубе» в полиэтиленовой оболочке [19]. Опыт температурной стабилизации грунтов с использованием системы «ВЕТ» на примере Южно-Хыльчуйского (ЯНАО) и Ванкорского (Красноярский край) месторождений представлен в работах [20, 21]. Проведены исследования по совершенствованию и повышению надежности системы «ВЕТ». В частности, исключено пересечение труб, в результате чего снижено взаимодействие хладагента с конденсатором и испарителем и взаимный контакт поверхностей труб во избежание разрушения защитного покрытия.

### **2.2. Противофильтрационные экраны и завесы, исключающие фильтрацию вод из накопителей**

Защита уступов бортов карьеров криолитозоны от растепления может осуществляться при возведении трех искусственных элементов: противофильтрационного экрана, защитной бермы и защитного покрытия [22]. Также для исключения фильтрации его хвостохранилища и обеспечения его полной экологической безопасности может использоваться устройство мерзлотной противофильтрационной завесы в нижней дамбе [14]. При создании противофильтрационных экранов на мерзлых грунтах в районах Крайнего Севера, Севера и районах сезонного уровня промерза-

ния грунта ниже глубины укладки противофильтрационного экрана обосновывается применение бентонитовых матов [23].

Методами физического моделирования подробно исследованы различные варианты устройства противофильтрационных экранов и технологические особенности их намыва, включающие подготовку основания, снятие почвенно-растительного слоя, прокладку траншеи по периметру хвостохранилища, закладку контрольно-измерительной сети и опорной топогеодезической сети, заполнение хвостами траншеи в основании дамбы, намыв противофильтрационного экрана ложа хвостохранилища [24]. Фильтрационная устойчивость хвостохранилища может быть обеспечена с применением противофильтрационных завес и экранов, являющихся основными типами противофильтрационных конструкций. Результаты опробования на хвостохранилище «Лебяжье» в Красноярском крае. Схожая технология применялась при строительстве хвостохранилища Норильского комбината, расположенного там же [6, 7].

Поскольку традиционные конструктивные решения и методы строительства не всегда пригодны в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов и многие противофильтрационные экраны в условиях низких температур до  $-50$ – $-60$  °С не сохраняют свою герметичность, для создания мерзлотных завес применяются различные специальные технологии, например системы «ГЕТ», сезоннодействующие парожидкостные энергонезависимые системы «ВЕТ» или индивидуальные термостабилизаторы. Технологии выполнения таких работ использовались на Юбилейном и Бованенковском месторождениях Ямало-Ненецкого автономного округа [25, 26].

Защита от фильтрации в условиях криолитозоны может быть также осуществлена с помощью прокладки у дна потенциально опасного участка водотока трубы, которая обеспечивала бы пропуск по меньшей мере воды водотока в объеме начала холодного периода [27].

### 2.3. Тампонажные технологии предотвращения фильтрации вод через плотины в условиях вечной мерзлоты

С учетом исключительно высокой стоимости активной и пассивной защиты многолетнемерзлых пород от растепления существенное внимание уделяется тампонажным технологиям. Значительный объем работ проводится по определению оптимальных тампонажных композиций для эффективной защиты дамб от фильтрации, поскольку пониженные температуры значительно увеличивают время ожидания затвердевания смесей, необходимое для набора растворами требуемой прочности, при которой возможно дальнейшее осуществление работ. Проблемы теплоизоляционных тампонажных материалов для условий многолетних мерзлых пород широко освещены в работе [28]. В исследовании [29] описан состав тампонажного раствора с повышенной гидравлической активностью при низких положительных и отрицательных температурах, твердение которых не сопровождается усадочными деформациями. Раствор включает

тампонажный портландцемент, облегчающую добавку – алюмосиликатные микросферы (10–15 %), расширяющий компонент – ОТОС (10 %) и жидкость затворения – 4%-й раствор хлористого кальция. Полученные данные свидетельствуют, что такой тампонажный раствор характеризуется удовлетворительными прочностью, сроками схватывания и значительным расширением, что позволяет рекомендовать его для цементирования в арктических условиях.

Проблемы разработки облегченных и сверхлегких растворов для использования в условиях аномально низких пластовых давлений и многолетних мерзлых пород рассмотрены в цикле работ Д.В. Орешкина с соавторами [28, 30–33]. В частности, разработан универсальный тампонажный материал, имеющий в своем составе полые стеклянные микросферы. Наибольшей эффективностью обладают тампонажные материалы с аппретированными микросферами и суперпластификаторами. При формировании тампонажного камня со стеклянными микросферами его структура и свойства значительно улучшаются; снижается общая пористость, а прочность растет более чем в два раза. Другая разработка этих же авторов для получения облегченного тампонажного раствора включает сырьевую смесь на основе тампонажного портландцемента, модифицирующей добавки, облегчающего наполнителя и жидкости затворения, где в качестве модифицирующей добавки содержится комплексная добавка длительной жизнеспособности «Murarog Combi 756», а в качестве наполнителя – полые керамические микросферы при соотношении ингредиентов (%): тампонажный портландцемент – 38–53,5; полые керамические микросферы – 10,7–22,8; комплексная добавка «Murarog Combi 756» – 0,114–0,16; жидкость затворения – вода или 2–8%-й раствор хлорида натрия или хлорида кальция – остальное. Такая сырьевая смесь позволяет повысить эффективность герметизации и защищает многолетние мерзлые породы от растепления [34].

Для тампонажа скважин в условиях многолетней мерзлоты эффективно применение смеси на основе типовых вяжущих и цемента. В работе [35] дана характеристика тампонажной смеси на основе гипса, которая отвечает специфическим требованиям тампонируемых грунтов в условиях Крайнего Севера. В то же время разрабатываются безгипсовые технологии тампонажа. На примере Ямбургского месторождения Ямало-Ненецкого автономного округа представлены результаты исследования по безгипсовым сухим тампонажным смесям [36]. Практичные многокомпонентные смеси с использованием особых функциональных добавок не нуждаются в дополнительном трансфере и смешивании отдельных компонентов и сохраняют технологические характеристики при длительном хранении в открытых площадках.

Для оценки условий надежного тампонируемых скважин газожидкостными тампонажными смесями в мерзлых породах проводился расчетный анализ температурного поля горного массива мерзлых пород с разной температурой, который позволил установить

условия эффективного применения данных смесей [37]. Разработке тампонажного материала для использования в условиях многолетнемерзлых пород, характеризующихся сплошной и прерывистой льдистостью, посвящено исследование [38]. В составе тампонажной смеси предлагается использовать (в %): порошок бруситовый каустический – 43,86–47,36; сернокислый магний – 8,32–13,81; воду, в результате чего был получен раствор с пониженной плотностью, который быстро схватывается и не растекает льдистую породу.

Вопросы получения облегченных быстротвердеющих расширяющихся тампонажных составов для крепления многолетнемерзлых и трещиноватых пород, предотвращения гидроразрывов пласта, газопроявлений и растепления многолетнемерзлых пород находят освещение в работе [39], где в составе смеси предлагается использовать (в %) тампонажный портландцемент для холодных скважин – 35,5–56,5; сернокислый алюминий – 2,0–5,0 торф – 2,0–10,3 и воду, что позволяет получить раствор с высокой степенью расширения, технологичными сроками схватывания при низких температурах, пониженной теплопроводностью и эффективной адгезией к металлу.

#### 2.4. Математическое моделирование для прогнозирования растепления грунтов

Важное значение придается вопросам надежности защиты многолетнемерзлых пород от растепления. В частности, уровень защиты от растепления может быть спрогнозирован путем изучения изменения влажности (влагопереноса) тампонажного камня [40]. Ряд прогностических исследований выполнен на примере Кумторского рудника, расположенного в Киргизии. В частности, для решения обратной задачи спецификации параметров места разрыва экрана использовалась нелинейная термогидромеханическая модель породы плотины хвостохранилища [41]. Кроме того, численные эксперименты позволили проанализировать, как размеры противofильтрационного экрана и смена температуры флюидов воздействуют на объем фильтрации в плотине. Авторы продемонстрировали, что на разрушение противofильтрационного экрана может указывать рост скорости изменения давления [42].

Прогнозная модель термического режима хвостохранилища на примере криолитозоны Магаданской области приводится в работе [43]. В частности, описаны результаты математического моделирования динамики температурного поля в отложениях хвостохранилища и окружающем массиве горных пород, определены параметры изолирующих грунтовых слоев, обеспечивающих мерзлое состояние складированных отходов, показана роль таких факторов, как конвекция воздуха в теле дамбы, режим заполнения хвостохранилища отходами и сезонно меняющиеся тепловые поля в окружающем породном массиве.

Составлена прогнозная модель сценария развития аварии на хвостохранилище, предусматривающая фильтрационные деформации в породе основания и тела плотины и размыв тела плотины, что приводит к ее разрушению [44]. Прогностическому расчету рас-

тепления мерзлого грунта посвящено исследование [45], в котором предложена методика, учитывающая фазовые превращения лед–вода в массиве предварительно охлажденного (замороженного) грунта после отключения охлаждающей системы.

#### 3. Международный опыт решения проблем контроля и предотвращения фильтрации вод через дамбы

Несмотря на актуальность проблемы фильтрационных вод на ГТС, связанных как с растеплением, так и с циклами «оттаивание–замерзание», а также проблемы подбора оптимальных растворов для создания различного рода завес, экранов, мембран, инъекций и пр., исследователи указывают на ограниченность разработок по этому направлению, равно как и на недостаток технической литературы по теме [46–49]. Обзор зарубежного опыта решения анализируемой проблемы показывает, что основная часть как научных исследований, так и технических разработок приходится на Канаду, которая имеет во многом схожие с российскими климатические условия и, как следствие, вынуждена решать схожие вопросы при постройке и дальнейшей эксплуатации гидротехнических сооружений в зонах вечной мерзлоты. Кроме того, зарубежные компании указывают на ограниченный и снижающийся объем финансирования для восстановления ГТС и соответствующую необходимость в разработке инновационных подходов к их поддержанию в состоянии, обеспечивающем безопасность окружающей среды [46, 50].

Следует отметить, что при решении вопросов снижения фильтрации в дамбах в условиях вечной мерзлоты зарубежными исследователями в основном применяются подходы, схожие с используемыми в отечественной практике. При этом анализ литературных данных показывает высокую долю вклада российских специалистов в решение проблемы. Детальный обзор по хвостохранилищам горнорудных предприятий, их физическим и химическим свойствам, повреждениям ограждающих дамб, воздействию технологических жидкостей на окружающую среду и обеспечение безопасности ГТС на хвостохранилищах проведен группой британских специалистов [50].

Значительный объем работ проводится канадскими инженерами и исследователями, работающими как в университетах, так и в технологических корпорациях. Так, на примере канадской ГТС Horizon Dam в качестве противofильтрационных мер в условиях холодного климата предлагается использовать метод «стена в грунте» [51]. В другом исследовании канадских специалистов из провинции Онтарио [52] рассматривается эффективность геомембран, способных обеспечить существенный барьер для утечки из хвостохранилищ: в опытной серии исследований была оценена чувствительность уровня просачивания к различным типам геомембран (линейный полиэтилен низкой плотности – LLDPE и полиэтилен высокой плотности – HDPE), размеру отверстия, эффекту морщин, эффекту регулярности контактов, давлению, проницаемости хвостов и проницаемости подкладки. Результаты испытаний показали, что утечка из хво-

стовых систем или систем геомембранного вкладыша на несколько порядков меньше, чем утечка из типовых систем. Исследование подтвердило, что практика, предполагающая укладку «дренажного» слоя поверх геомембранного вкладыша с целью уменьшения напора на него, непродуктивна, поскольку обеспечивает путь для утечки из вышележащих уплотняющих слоев. Это наблюдение в сочетании с тем, что большинство отверстий в геомембранных вкладышах образуются во время размещения вышележащего дренажного или защитного слоя, подтверждает, что оптимальным практическим подходом является обеспечение того, чтобы хвосты были размещены непосредственно над геомембранным вкладышем. В рамках исследования также показано, что старение геомембран значительно снижается при постоянной температуре, а оптимизация материалов и окислителей, которые используются для изготовления вкладыша, может увеличить срок его службы.

Проблеме создания противофильтрационного экрана в условиях вечной мерзлоты северной части Канады посвящена работа [53], где создание экрана проводилось в рамках расширения хвостохранилища. Во время его установки была проведена обработка верхнего и нижнего трещиноватых оснований. Сложные условия, которые включали низкое качество грунта и разрушенное морозом основание, требовали применения комбинированного решения для обеспечения быстрого затвердевания и достижения целевой глубины экрана. Дополнительные проблемы, которые были решены, включали ограниченные объемы раствора и необходимость непрерывного мониторинга окружающей среды.

Сотрудниками нескольких канадских технологических компаний проведено исследование по созданию противофильтрационных преград для дамб на основе карбонатных горных пород [54]. Представлен обзор подходов к проектированию и конструированию различного рода завес для устранения фильтрации, исследованы их эксплуатационные характеристики. Опыт создания бетонных завес в твердых горных породах с высокой степенью проницаемости побудил исследователей создать композитную завесу. На этапе подготовительных работ в зонах с высокой проницаемостью вначале проводилось высококачественное бурение, испытания на проницаемость и цементация для герметизации трещин, а также детально исследовалась геологическая основа для последующего определения локации и протяженности будущей противофильтрационной бетонной завесы. Показано, что концепция «композитной стены» своевременна и экономически эффективна в сравнении с другими дорогостоящими подходами.

Решению проблем фильтрации вод на бетонной плотине des Quinze Dam, расположенной в канадской провинции Квебек, посвящено исследование [55]. Для снижения утечки были предприняты многочисленные подходы к цементации. Первоначальная цементация была завершена основными цементно-водными растворами с последующей цементацией с добавлением

тиксотропного агента Celbex. Окончательная цементация проводилась в несколько этапов малоподвижными (low mobility grouting – LMG) и сбалансированными стабильными растворами высокой подвижности (high mobility grouting – HMG) с использованием полиуретанового раствора и силиката натрия для контроля схватывания. Данная программа выполнялась в зимних условиях, требующих специального оборудования и техники.

Проблемы при создании противофильтрационной стены с применением метода струйной цементации на дамбе John Hart North Earthfill Dam в канадской провинции Британская Колумбия рассмотрены в исследовании [56]. Чтобы обеспечить дополнительную защиту 70-летней плотины, компания BC Hydro занялась возведением дополнительной противофильтрационной стены в северной части дамбы, используя технологию струйной цементации, где высокоскоростная струйная смесь подается под высоким давлением (от 300 до 500 бар) для размывания почвы с ее одновременным смешиванием с раствором. Основная проблема заключалась в поддержании высокого давления во время возведения стены. В работе описаны процедуры струйной цементации, состав используемой смеси, результаты полевых испытаний, а также меры по обеспечению безопасности и охраны окружающей среды.

Технология струйной цементации, ее преимущества перед другими мерами предотвращения фильтрации, а также несколько примеров конкретного применения данного подхода подробно изложены в работе сотрудников американской компании Schnabel Foundation Company [57]. Особенности использования струйного цементирования при создании противофильтрационных завес также описаны специалистами международной группы компаний по геотехническим решениям Keller Group [46]. Отмечается, что решение проблемы фильтрации на существующих плотинах с использованием технологии струйной цементации делает этот подход все более экономически выгодной альтернативой другим методам. Авторы приводят краткое описание технологии, фокусируясь на технических аспектах, важных на этапах проектирования и восстановления дамб. Также приводится список дамб, успешно использующих данную технологию.

Представляют определенный интерес работы сотрудников Университета Калгари из канадской провинции Альберта, демонстрирующих преимущества технологии нагнетания противофильтрационной завесы в каменных сооружениях, расположенных в холодных климатических условиях [47, 48]. При создании противофильтрационной завесы использовался метод моделирования «латинский гиперкуб» в сочетании с параметрической моделью с конечным числом элементов для рандомизации свойств материала каждого камня и соответствующих слоев цементации. Вопросы оптимального расположения оси дамбы в сочетании с вопросами обеспечения снижения проницаемости грунта и проектирования противофильтрационной завесы изучены в работе [58].

Метод создания полимерной ультратонкой противофильтрационной стены описан в патенте [59] и включает следующие этапы: формирование непрерывных слотов на участках дамбы, требующих усиления и защиты от фильтрации; впрыскивание двухкомпонентных расширяющихся полимерных тампонажных материалов в прорези. Объем быстро расширяется, после того как полимерные тампонажные материалы вступают в реакцию, и прорези заполняются, формируя полимерную ультратонкую основу. Смежные сверхтонкие полимерные основы совместно цементируются, образуя непрерывную и однородную зацементированную ультратонкую полимерную противофильтрационную стену. Преимущества такого подхода, рекомендуемого для укрепления дамб, заключаются в скорости строительства, ультратонкости, легкости, высокой прочности, экономичности и долговечности.

Существенный интерес к снижению фильтрационных потоков на дамбах в условиях холодного климата проявляют исследователи из Китая, высокогорные регионы которого имеют схожие с Россией условия холодного климата и вечной мерзлоты. Например, в работе [60] описана технология создания бетонного экрана на каменно-набросных и песчано-гравийных дамбах высотой более 100 м в Синьцзяне. Показаны инновационные достижения в плане проектирования плотины с защитой от сейсмических событий, деформаций и фильтрации. Задача создания горизонтальной пластмассовой дрены в дамбах на вечномерзлых грунтах Тибетского нагорья рассматривается в работе [61].

Задача снижения фильтрационного потока в вечномерзлых грунтах Тибетского нагорья также решается в работе [62], где авторы предлагают собственную технологию заполнения слоя разорванной каменной породы, одновременно решая задачу защиты слоя мерзлого грунта от размораживания. Проблема двойственного характера, включающая теплопередачу и фильтрацию, решена с применением математических методов Галеркина и Кранка–Николсона, а также представлено соответствующее программное обеспечение.

На примере дамбы Вудонгде, расположенной в Китае, проанализированы значимые при возведении противофильтрационной завесы геологические факторы, включая карст, брекчии, структурную плоскость, разлом, угол пересечения между завесой и группой горных пород [49]. В соответствии с характеристиками различных геологических факторов были предложены оптимальные методы заполнения тампонажным раствором и динамической регулировки давления тампонажного материала.

В работе [63] на примере дамб каменно-набросного типа рассмотрены вопросы создания противофильтрационных преград вертикального, горизонтального и комбинированного типов. Описаны технологии возведения противофильтрационных бетонных стен и завес, а также технологии горизонтального покрытия. В численном моделировании

фильтрационного контроля дамбы авторы прибегают к методам конечных элементов (finite element method – FEM) и методам граничных элементов (boundary element method – BEM), которые были применены в трех конкретных инженерных проектах. Даны предложения по контролю фильтрационных вод на дамбах каменно-набросного типа.

Отдельное внимание исследователи уделяют свойствам и характеристикам растворов для создания противофильтрационных завес. Так, в работе ученых из канадского Университета западного Онтарио рассмотрены механические и гидравлические свойства пластичного бетона (PL-C) для противофильтрационных завес [64]. Пластичный бетон используется при строительстве противофильтрационных завес в дамбах и содержит цемент, заполнитель и воду, смешанные с бентонитом натрия. Добавление бентонита натрия приводит к снижению прочности и повышению пластичности после разрушения по сравнению с обычным бетоном. Механические свойства пластичного бетона исследованы в серии испытаний на неограниченное сжатие и на сжатие в ограниченном объеме, проводимых с одновременной фильтрацией воды через опытные образцы. Результаты испытаний показали, что гидравлическая проводимость пластичного бетона возрастает от двух до трех порядков во время трехосного сжатия из-за образования трещин и их расширения. Показано, что такие деформации необходимо свести к минимуму на этапах проектирования путем контроля рабочих напряжений и использования устойчивых к эрозии смесей.

В работе американских исследователей из компании Sovereign International, производящей полимерные растворы, описаны технология использования и рабочие характеристики полимерной эмульсии для создания плотных и гибких противофильтрационных конструкций [65]. Демонстрируется экономическая эффективность использования подобных эмульсий.

В исследовании [66] обращается внимание на несовершенство современных технологий, призванных предотвращать фильтрацию на дамбах хвостохранилищ горнорудных предприятий, и на необходимость комплексного подхода к решению этой проблемы. Исследователями разработана технология создания не вступающего в реакцию с водой химически устойчивого полимерного раствора для строительства противофильтрационных преград на дамбах хвостохранилищ. Результаты испытаний показали, что технология использования предложенной полимерной стены вызвала незначительные нарушения в дамбе хвостохранилища, обладала хорошими противофильтрационными характеристиками и продемонстрировала долговечность.

#### **Заключение**

Основные технические решения по контролю и предотвращению фильтрации из хвостохранилищ горно-обогатительных предприятий включают мероприятия по управлению температурным режимом грунтов, противофильтрационные экраны и завесы,

тампонажные технологии предотвращения фильтрации вод через плотины и прилегающий горный массив в условиях вечной мерзлоты.

Мероприятия по управлению температурным режимом грунтов включают: математическое моделирование теплообменных процессов, использование сезоннодействующих охлаждающих устройств, системы теплоизолирующих труб для водоотведения и отведение тепла при помощи тепловых насосов.

Противофильтрационные экраны создаются путем бурения наклонных скважин с последующей проморозкой естественным холодом, устройства защитных берм с применением послойного намораживания вскрышных пород и защитного покрытия для предотвращения растепления при помощи влаго-, тепло- и светоотражающего мата. При создании противофильтрационных экранов на мерзлых грунтах в районах сезонного уровня промерзания грунта ниже глубины укладки противофильтрационного экрана обосновывается применение бентонитовых матов. Мерзлотные завесы на основе парожидкостных энергонезависимых систем или индивидуальных термостабилизаторов используются для сохранения герметичности экрана при температурах до  $-50$ – $-60$  °С.

Основные освещенные в литературе тампонажные технологии предотвращения фильтрации вод через

плотины и прилегающий горный массив в условиях вечной мерзлоты включают использование растворов на основе тампонажного портландцемента, облегчающих добавок (например, алюмосиликатные микро-сферы), расширяющего компонента и жидкости затворения (например, раствор хлористого кальция); тампонажных смесей на основе гипса, бруситового каустического порошка, сернокислого магния, торфа.

Перспективным направлением в разработке противофильтрационных мероприятий на предприятиях, расположенных в районах Севера и вечной мерзлоты, является использование криогелей, создающих завесу, которая упрочняется при замораживании и оттаивании.

Анализ публикаций за период с 2000 г. по настоящее время показал, что, несмотря на актуальность проблемы утечек фильтрационных вод на хвостохранилищах горнодобывающих предприятий, отмечается ограниченность опубликованных разработок и недостаток технической литературы по этому направлению.

*Исследование выполнено по программам ФНИ 0266-2019-0008 и IX.128.1, при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-011-00531.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка кислотообразующего/кислотонейтрализующего потенциалов отвальных пород и подвижности потенциально токсичных элементов Раздолинского рудного узла (Красноярский край) / С.Б. Бортникова, Н.В. Силантьева, А.Н. Запольский, Н.В. Юркевич, О.П. Саева, А.Я. Шевко, О.В. Шуваева, А.В. Еделев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 55–72.
2. Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Аминов П.Г. Геохимические особенности миграционных потоков в зоне влияния горно-промышленного техногенеза (г. Медногорск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 85–94.
3. Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Саева О.П. Геохимическое моделирование поведения тяжелых металлов в техногенных системах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 89–101.
4. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area / N.V. Yurkevich, N.A. Abrosimova, S.B. Bortnikova, Y.G. Karin, O.P. Saeva // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2017. – V. 99. – № 9–10. – P. 1328–1345.
5. Kotsemir M., Shashnov S. Measuring, analysis and visualization of research capacity of university at the level of departments and staff members // Scientometrics. – 2017. – V. 112. – № 3. – P. 1659–1689.
6. Базоев Х.А., Волянский И.В., Бутюгин В.В. Геоэкологические аспекты эксплуатации хвостохранилищ в зоне вечной мерзлоты // Обогащение руд. – 2006. – № 6. – С. 39–41.
7. Базоев Х.А., Волянский И.В., Бутюгин В.В. Основные принципы обеспечения фильтрационной устойчивости хвостохранилищ в северных регионах // Обогащение руд. – 2006. – № 5. – С. 39–42.
8. Лолаев А.Б., Бутюгин В.В. Накопители отходов рудообогащения в условиях Крайнего Севера. Проблемы и пути решения // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы 2 Международной конференции. – М., 15–18 сентября 2003. – М.: Изд-во РУДН, 2003. – С. 265–270.
9. Технологические особенности строительства грунтовых плотин дражных полигонов в условиях россыпного месторождения криолитозоны / А.М. Бураков, С.А. Ермаков, М.В. Каймонов, А.С. Курилко, Ю.А. Хохолов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 8. – С. 271–276.
10. Формирование выемочного пространства россыпных месторождений криолитозоны / С.А. Ермаков, А.С. Курилко, А.М. Бураков, М.В. Каймонов, Ю.А. Хохолов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 10. – С. 63–69.
11. Способ возведения насыпных низконапорных плотин мерзлого типа в климатических условиях севера Якутии / А.С. Чаадаев, М.А. Комаров, С.Н. Долгих, И.А. Максимов // Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 50–53.
12. Опыт эксплуатации хвостохранилищ в Норильском промышленном районе / В.В. Бутюгин, М.С. Скачков, Е.А. Гулан, Б.С. Пыхтин, В.А. Конев // Горный журнал. – 2004. – № 5. – С. 54–58.
13. Кузнецов Г.И. Накопители промышленных отходов в зоне вечной мерзлоты // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 4. – С. 65–80.
14. Кузнецов Г.И., Балацкая Н.В. Экологически безопасные накопители промышленных отходов на Крайнем Севере // Экологические системы и приборы. – 2013. – № 3. – С. 38–46.
15. Система улавливания стоков из хвостохранилищ на вечномерзлых грунтах: пат. РФ № 2223362; рег. № заявки изобр. 2001127345/13, заявл. 08.10.2001, опубл. 10.02.2004.
16. Романова Е.К., Курилко А.С., Киселев В.В. Управление устойчивостью уступов кимберлитовых карьеров криолитозоны с помощью теплоизолированного оградительного сооружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S24 – С. 264–271.
17. Analysis of the operating capacity of seasonally functioning cooling devices using operational data of waterworks facilities / N.A. Buchko, I.A. Maksimov, M.P. Pavchich, V.A. Turchina // Power Technology and Engineering. – 2004. – V. 38. – № 2. – P. 65–70.
18. Надпакерная жидкость на углеводородной основе для предотвращения растепления мерзлых пород / Ж.С. Попова, Д.А. Небогин, Р.В. Плаксин, Н.В. Козлова, И.Н. Кустышева // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – № 1. – С. 27–31.

19. Гелисханов А.Б. Применение теплоизолирующих труб для изоляции зон ММП при строительстве скважин на Уренгойской группе месторождений // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации): Материалы 8 Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Муравленко. – Тюмень, 24 декабря 2012. – Т. 1. – С. 37–38.
20. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стрижков С.Н. Опыт термостабилизации грунтов устьев нефтяных и газовых скважин с использованием систем ВЕТ // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 3. – С. 80–82.
21. Система «ВЕТ» – современное техническое решение для температурной стабилизации грунтов устьев нефтегазовых скважин // Газовая промышленность. – 2016. – № 3. – С. 112–113.
22. Способ защиты уступов бортов карьеров криолитозоны от растепления: пат. РФ № 2551583; заявл. 20.02.2014, опубл. 27.05.2015.
23. Проблемы устройства противофильтрационных экранов на мерзлых и вечномерзлых грунтах / В.А. Яковлев, Е.С. Круглова, О.А. Ильина, Е.В. Баранихин // Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и ремонта нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса: Материалы 20 Международной научно-практической конференции. – Суздаль, 7–10 июня 2016. – С. 139–141.
24. Гулан Е.А. Обеспечение экологической безопасности гидротехнических сооружений в криолитозоне // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы 7 Международной конференции. – М.–Ереван, 15–19 сентября 2008. – М.: РУДН, 2008. – С. 305–306.
25. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стрижков С.Н. Ледяной экран для полигона на Крайнем Севере // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 11. – С. 17–19.
26. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стрижков С.Н. Экотехнологии и оборудование: внедрение инновационных экологически чистых технологий при утилизации ТБО в криолитозоне // Экологический вестник России. – 2012. – № 1. – С. 29–33.
27. Способ защиты горных выработок от прорыва воды со стороны водотока в условиях вечной мерзлоты: пат. РФ № 2394962; заявл. 20.05.2009, опубл. 20.07.2010.
28. Орешкин Д.В., Фролов А.А., Ипполитов В.В. Проблемы теплоизоляционных тампонажных материалов для условий многолетних мерзлых пород. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. – 236 с.
29. Облегченный тампонажный цемент для низкотемпературных скважин / В. Овчинников, В. Кузнецов, А. Фролов, Ю. Газиреев // Бурение и нефть. – 2004. – № 5. – С. 32–33.
30. Орешкин Д.В. Облегченные и сверхлегкие тампонажные растворы для крепления нефтегазовых скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 10. – С. 34–36.
31. Орешкин Д.В., Близнюков В.Ю. Современные тенденции разработки универсальных сверхлегких тампонажных растворов для условий АНПД и ММП // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2007. – № 2. – С. 49–56.
32. Сырьевая смесь для получения теплозащитного тампонажного материала для условий многолетних мерзлых пород: пат. РФ № 2267004; заявл. 31.10.2003, опубл. 27.12.2005.
33. Орешкин Д.В., Янкевич В.Ф., Первушин Г.Н. Проблемы крепления стенок при строительстве нефтяных и газовых скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2002. – № 7–8. – С. 43–46.
34. Сырьевая смесь для получения облегченного тампонажного раствора: пат. РФ № 2472835; заявл. 01.07.2011, опубл. 20.01.2013.
35. Медведев Ю.В. Эффективное решение для тампонирувания скважин в новых нефтепромысловых районах // Нефть. Газ. Новации. – 2013. – № 3. – С. 38–40.
36. Речалов Д.А., Коростелев А.С., Кузнецов В.Г. Эффективность применения арктических тампонажных систем в интервалах залегания мерзлых пород // Труды 10 Международной конференции по мерзлотоведению (TICOP 2012). – Салехард, 25–29 июня 2012. – Т. 5. – С. 261.
37. Яковлев А.А. Анализ условий надежного тампонирувания скважин газожидкостными тампонажными смесями // Записки Горного института. – 2012. – Т. 197. – С. 71–74.
38. Тампонажный материал: пат. РФ № 2460754; заявл. 30.03.2011, опубл. 10.09.2012.
39. Расширяющийся тампонажный состав для низкотемпературных скважин: пат. РФ № 2155263; заявл. 15.01.1998, опубл. 27.08.2000.
40. Орешкин Д.В., Первушин Г.Г. Изменение влажности и теплопроводности цементного тампонажного камня с полыми стеклянными микроферами во времени // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2003. – № 2. – С. 41–43.
41. Оценка сохранности защитного покрытия хвостохранилища рудника Кумтор (Кыргызская Республика) на основе решения обратной задачи по данным измерения давления в наблюдательных скважинах / Л.А. Назарова, Л.А. Назаров, А.В. Панов, Н.А. Мирошниченко, М.К. Чыныбаев // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 34–37.
42. Evolution of thermohydrodynamic fields at tailings dam at Kumtor mine (Kyrgyz Republic) / L.A. Nazarova, L.A. Nazarov, M.D. Dzhamanbaev, M.K. Chynybaev // Journal of Mining Science. – 2015. – V. 51. – № 1. – P. 17–22.
43. Buiskikh A.A., Zamoshch M.N. Prediction of thermal regime within a tailing dump under permafrost // Journal of Mining Science. – 2010. – V. 46. – № 1. – P. 28–33.
44. Алешин Ю.Г., Торгоев И.А., Чукин Б.А. Риски на участках заложения высокогорных хвостохранилищ (внутренний Тянь-Шань): идентификация в процессе эксплуатации // Проблемы снижения природных опасностей и рисков: Материалы Международной научно-практической конференции «Геориск-2012». – М., 18–19 октября 2012. – Т. 2. – С. 6–14.
45. Khrustalev L.N. Analysis of the warming of frozen soil around a cooling column after its disconnection // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2001. – V. 38. – № 2. – P. 69–73.
46. Jet grouting to construct a seepage cutoff around a spillway / M.C. Canino, C.H. Starling Iii, W.K. Endo, J. Gault // Association of State Dam Safety Officials – Dam Safety 2006, Proceedings from the 2006 Annual Conference. – 2006. – P. 220–239.
47. Isfeld A.C. Numerical modelling of grout injection in stone masonry walls // Masonry International. – 2016. – V. 29. – № 3. – P. 73–84.
48. Uncertainty analysis of the effect of grout injection on the deformation of multi-wythe stone masonry walls / A.C. Isfeld, E. Moradabadi, D.F. Laefer, N.G. Shrive // Construction and Building Materials. – 2016. – V. 126. – P. 661–672.
49. Geological factors and its treatment measures of dams anti-seepage grouting curtain at Wudongde hydropower station / J. Xiang, T. Wang, K. Ni, L. Wan, Y. Shi, W. Hu // Journal of Jilin University (Earth Science Edition). – 2018. – V. 48. – № 5. – P. 1581–1588.
50. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation / D. Kossoff, W.E. Dubbin, M. Alfredsson, S.J. Edwards, M.G. Macklin, K.A. Hudson-Edwards // Applied Geochemistry. – 2014. – V. 51. – P. 229–245.
51. Design and construction of a seepage cut off wall using the slurry trench technique in cold temperatures at the Horizon Dam project / L.A. Barr, J.C. Sobkowicz, C. Kwok, R. Armstrong, J. Henderson // Canadian Geotechnical Conference. – 2010. – V. 63. – P. 735–741.
52. Joshi P., McLeod H. Effectiveness of geomembrane liners in minimizing seepage in tailings storage facilities – New knowledge // 26<sup>th</sup> International Congress on Large Dams. – Vienna, Austria, 4–6 July, 2018. – P. 368–381.
53. Rombough V.T., Davies J.A., Hoy J.P. Grout curtain installation for sump excavation in permafrost region of Northern Canada // Geotechnical Special Publication. – 2017. – P. 106–115.
54. Bruce D.A., Dreese T.L., Heenan D.M. Design, construction, and performance of seepage barriers for dams on carbonate foundations // Environmental and Engineering Geoscience. – 2010. – V. 16. – № 3. – P. 183–193.
55. Mixed grouting methods and materials for under-seepage mitigation at Barrage des Quinze Dam, Quebec, Canada / M.J. Byle, D. Dery-Chamberland, P. Bowman, M. Dubeau // Geotechnical Special Publication. – 2017. – P. 58–66.
56. Gazzarrini P., Siu D., Jungaro S. Construction of a jet-grouted backup seepage cut-off wall in the John Hart North Earthfill Dam // Geotechnical Special Publication. – 2017. – P. 92–101.

57. Niemann M.J., Jenevein D.R., Worst S.L. Jet grouting for water cutoff and excavation support // Geotechnical Special Publication. – 2017. – P. 124–134.
58. Canoglu M.C. Selection of suitable dam axis location considering permeability and grout curtain optimization // Environmental and Engineering Geoscience. – 2019. – V. 25. – № 1. – P. 15–25.
59. Polymer grouting method for constructing ultra-thin anti-seepage wall: pat. USA № 20140314498; published 23.10.2014.
60. Deng M.J. Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. – 2012. – V. 34. – № 6. – P. 985–996.
61. Test and mechanism of horizontal plastic drain in permafrost regions embankment / J.H. Hu, R. Wang, M.J. Hu, K.P. Zhou // Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology). – 2009. – V. 40. – № 5. – P. 1451–1456.
62. Xuefu Z., Yaonan Z. Study on a new-styled measure for treating water leakage of the permafrost tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2006. – V. 21. – № 6. – P. 656–667.
63. Shen Z., Qiu L., Zhou H. Review of seepage control of earth-rockfill dams on thick overburden layer // Advances in Science and Technology of Water Resources. – 2015. – V. 35. – № 5. – P. 27–35.
64. Hinchberger S., Weck J., Newson T. Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls // Canadian Geotechnical Journal. – 2010. – V. 47. – № 4. – P. 461–471.
65. Polymer emulsion grouting for water cutoff in tunnel structures / P.M. Gancarz, J.E. Minturn, N.J. Grobler, D. Van Dyk // Geotechnical Special Publication. – 2017. – P. 295–302.
66. Guo C., Chu X., Wang F. The feasibility of non-water reaction polymer grouting technology application in seepage prevention for tailings reservoirs // Water Science and Technology: Water Supply. – 2018. – V. 18. – № 1. – P. 203–213.

Поступила 13.03.2020 г.

#### Информация об авторах

**Юркевич Н.В.**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией эколого-экономического моделирования техногенных систем, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Юркевич Н.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрохимии, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Гуреев В.Н.**, кандидат педагогических наук, старший научный сотрудник информационно-аналитического центра, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; Новосибирский государственный технический университет.

**Мазов Н.А.**, кандидат технических наук, заведующий информационно-аналитическим центром, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 624.136:551.345

## PROBLEMS OF CONTROLLING WATER FILTRATION IN HYDRAULIC STRUCTURES IN PERMAFROST REGIONS

**Nikolay V. Yurkevich**<sup>1</sup>,  
YurkevichNV2@ipgg.sbras.ru

**Natalia V. Yurkevich**<sup>1</sup>,  
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Vadim N. Gureyev**<sup>1,2</sup>,  
GureyevVN@ipgg.sbras.ru

**Nikolay A. Mazov**<sup>1</sup>,  
MazovNA@ipgg.sbras.ru

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

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University,  
136, Nemirovicha-Danchenko street, Novosibirsk, 630087.

**The relevance** of the research is caused by the environmental risks in relation to the technogenic thawing of permafrost soils in the waste storage sites of mining enterprises in the Far North.

**The main aim** of the research is the analysis of world experience on the problems of the permafrost degradation, the filtration channels in fractured tectonic zones development, which cause leakage of circulating water from tailings of mining and processing enterprises, and the search for technological solutions aimed at reducing the filtration flow and preventing environmental problems.

**Methods:** retrospective analysis of publications selected as a result of a search in domestic and international bibliographic databases, including the abstract journal VINITI RAS, Russian Science Citation Index and Scopus bibliographic index from Elsevier, from 2000 to the present.

**Results.** Controlling filtration in tailing dams in permafrost conditions is primarily carried out using management of thermal cycles of soils, constructing anti-seepage screens and curtains, as well as using grouting techniques. The main approaches described in research literature include the use of solutions of artificial cement, lightweights (aluminosilicate microspheres), expanding component and tempering fluids (calcium chloride solution); gypsum-based grouting mixtures, brucite caustic solution, magnesium sulphate, and turf. The use of cryogels constructing a screen that become firmer during freezing-thawing cycles is another promising technique in designing anti-seepage constructions in North and permafrost regions. The analysis of publications from 2000 to the present has shown that despite the urgency of the mine drainage problem, there is a limitation of published research and a lack of technical literature in this area.

### Key words:

Permafrost, thawing soils, hydraulic structures, dyke, embankment, tailing dam, review.

The reported study was carried out in the framework of the Fundamental Research Programs (nos. IX.128.1, 0266-2019-0008) and partly funded by RFBR according to the research project no. 19-011-00531.

### REFERENCES

- Bortnikova S.B., Silantyeva N.V., Zapolsky A.N., Yurkevich N.V., Saeva O.P., Shevko A.Y., Shuvaeva O.V., Edelev A.V. Assessment of acidbase accounting of mine waste rocks and mobility of potentially toxic elements of the Razdolinsky ore field (Krasnoyarsk Territory). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 55–72. In Rus.
- Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Aminov P.G. Geochemical features of migration flows in the impact zone of mining technogenesis (Mednogorsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 2, pp. 85–94. In Rus.
- Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Saeva O.P. Geochemical modeling of heavy metals behavior in technogenic systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 89–101. In Rus.
- Yurkevich N.V., Abrosimova N.A., Bortnikova S.B., Karin Y.G., Saeva O.P. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2017, vol. 99, no. 9–10, pp. 1328–1345.
- Kotsemir M., Shashnov S. Measuring, analysis and visualization of research capacity of university at the level of departments and staff members. *Scientometrics*, 2017, vol. 112, no. 3, pp. 1659–1689.
- Bazoev Kh.A., Volyanskiy I.V., Butyugin V.V. Geoekologicheskie aspekty ekspluatatsii khvostohranilishch v zone vечноy merzloty [Geocological aspects of tailings disposal systems operation in permafrost zone]. *Obogashchenie Rud*, 2006, no. 6, pp. 39–41.
- Bazoev Kh.A., Volyanskiy I.V., Butyugin V.V. Osnovnye printsipy obespecheniya filtratsionnoy ustoychivosti khvostohranilishch v severnykh regionakh [Main principles of providing tailings storage facilities seepage stability in northern regions]. *Obogashchenie Rud*, 2006, no. 5, pp. 39–42.
- Lolaev A.B., Butyugin V.V. Nakopiteli otkhodov rudoobogashcheniya v usloviyakh Kraynego Severa. Problemy i puti resheniya [Tailing ponds at ore cleaning sites at the Far North. Problems and solutions]. *Resursovosproizvodnyashchie, malootkhodnye i prirodokhrannye tekhnologii osvoeniya nedr. Materialy 2 mezhdunarodnoy konferentsii* [Resource reproductive, low waste and nature saving techniques of exploitation. Materials of the 2<sup>nd</sup> International conference]. Moscow, 15–18 September 2003. pp. 265–270.
- Burakov A.M., Ermakov S.A., Kaymonov M.V., Kurilko A.S., Khokholov Yu.A. Tekhnologicheskie osobennosti stroitelstva gruntovykh plotin drazhnykh poligonov v usloviyakh rossypnogo mestorozhdeniya kriolitozony [Technological features of building of earth dams in the grounds under conditions of placers of cryolitic zones]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2006, no. 8, pp. 271–276.

10. Ermakov S.A., Kurilko A.S., Burakov A.M., Kaymonov M.V., Hokholov Yu.A. Formirovaniye vyemochnogo prostranstva rossypnykh mestorozhdeniy kriolitozony [Formation of winning space in placer mines in cryolitic zones]. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2008, no. 10, pp. 63–69.
11. Chaadaev A.S., Komarov M.A., Dolgikh S.N., Maksimov I.A. Sposob vozvedeniya nasypnykh nizkonapornykh plotin merzlogo tipa v klimaticheskikh usloviyakh severa Yakutii [The way of building the poured low pressure frozen type dams in the climate conditions of the north of Yakutia]. *Gornyye Zhurnal*, 2012, no. 4, pp. 50–53.
12. Butyugin V.V., Skachkov M.S., Gulan E.A., Pyhtin B.S., Konev V.A. Opyt ekspluatatsii khvostohranilishch v Norilskom promyshlennom rayone [The influence of natural and man-caused factors on stability of constructions located in cryolite area is analyzed]. *Gornyye Zhurnal*, 2004, no. 5, pp. 54–58.
13. Kusnetsov G.I. Nakopiteli promyshlennykh otkhodov v zone vechnoy merzloty [Stores of industrial wastes in a permafrost zone]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo*, 2015, no. 4, pp. 65–80.
14. Kuznetsov G.I., Balatskaya N.V. Ekologicheski bezopasnye nakopiteli promyshlennykh otkhodov na Kraynem Severe [Ecologically safe stores of industrial wastes on the Far North]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2013, no. 3, pp. 38–46.
15. Babello V.A., Petrov V.S., Belyakov A.E. Sistema ulavlivaniya stokov iz khvostohranilishch na vechnomerzlykh gruntakh [System of capture of flows from tailing dams in permafrost rocks]. Patent RF no. 2223362, 2004.
16. Romanova E.K., Kurilko A.S., Kiselev V.V. Upravleniye ustoychivostyu ustupov kimberlitovykh karerov kriolitozony s pomoshchyu teploizolirovannogo ograditel'nogo sooruzheniya [Management of stability of benches in cryolitic zones using heat insulated protective construction]. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. S24, pp. 264–271.
17. Buchko N.A., Maksimov I.A., Pavchich M.P., Turchina V.A. Analysis of the operating capacity of seasonally functioning cooling devices using operational data of waterworks facilities. *Power Technology and Engineering*, 2004, vol. 38, no. 2, pp. 65–70.
18. Popova Zh.S., Nebogin D.A., Plaksin R.V., Kozlova N.V., Kustysheva I.N. Nadpakernaya zhidkost na uglevodorodnoy osnove dlya predotvrashcheniya rastepeniya merzlykh porod [Packer fluid based on carbon hydrate for preventing thawing of frozen rocks]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2012, no. 1, pp. 27–31.
19. Geliskhanov A.B. Primeneniye teploizoliruyushchikh trub dlya izolyatsii zon MMP pri stroitelstve skvazhin na Urengoy'skoy gruppe mestorozhdeniy [The use of heat sealing pipes to isolate permafrost zones when building boreholes at Urengoy deposits]. *Geologiya i neftegazonosnost Zapadno-Sibirskogo megabassayna (opyt, innovatsii). Materialy 8 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.I. Muravlenko* [Geology and oil and gas bearing capacity of Western Siberian megabassin (experience, innovations). Materials of the 8<sup>th</sup> All-Russian scientific-practice conference dedicated to the 100 anniversary V.I. Muravlenko]. Tyumen, 24 December 2012. Vol. 1, pp. 37–38.
20. Dolgikh G.M., Okunev S.N., Strizhkov S.N. Opyt termostabilizatsii gruntov ustev neftyanykh i gazovykh skvazhin s ispolzovaniem sistem VET [Thermostabilization of oil and gas well heads soils with use of vertical naturally acting systems]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2012, no. 3, pp. 80–82.
21. Sistema «VET» – sovremennoe tekhnicheskoe reshenie dlya temperaturnoy stabilizatsii gruntov ustev neftegazovykh skvazhin [VET system – modern technique for temperature stabilization of rocks of collar of oil-and-gas wells]. *Gazovaya promyshlennost*, 2016, no. 3, pp. 112–113.
22. Kurilko A.S., Kiselev V.V., Romanova E.K., Akishev A.N. Sposob zashchity ustupov bortov karerov kriolitozony ot rastepeniya [An approach to defense shelves of open pit sites against thawing in cryolitic zone]. Patent RF no. 2551583, 2015.
23. Yakovlev V.A., Kruglova E.S., Ilina O.A., Baranikhin E.V. Problemy ustroystva protivofiltratsionnykh ekranov na merzlykh i vechnomerzlykh gruntakh [Problems of constructing cut-off curtains in frozen and permafrost rocks]. *Reagenty i materialy dlya stroitelstva, ekspluatatsii i remonta neftyanykh, gazovykh i gazovokondensatnykh skvazhin: proizvodstvo, svoystva i opyt primeneniya. Ekologicheskie aspekty neftegazovogo kompleksa. Materialy 20 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Agents and materials for construction, maintenance and repair of oil, gas and gas-condensate wells: production, features, and experiences of application. Ecological aspects of oil-and-gas complex. Materials of the 20<sup>th</sup> International scientific and practice conference]. Suzdal, 7–10 June, 2016, pp. 139–141.
24. Gulan E.A. Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v kriolitozone [Providing ecological safety of hydraulic structures in cryolitic zone]. *Resurso-vosproizvodnyashchie, malootkhodnye i prirodookhrannyye tekhnologii osvoeniya nedr. Materialy 7 Mezhdunarodnoy konferentsii* [Resource reproductive, low waste and nature saving techniques of exploitation. Materials of the 7<sup>th</sup> International conference]. Moscow–Erevan, 15–19 September 2008, pp. 305–306.
25. Dolgikh G.M., Okunev S.N., Strizhkov S.N. Ledyanoy ekran dlya poligona na Kraynem Severe [Ice screen for traverse at the Far North]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2011, no. 11, pp. 17–19.
26. Dolgikh G.M., Okunev S.N., Strizhkov S.N. Ekotekhnologii i oborudovaniye: vnedreniye innovatsionnykh ekologicheskikh chistykh tekhnologii pri utilizatsii TBO v kriolitozone [Ecotechnologies and equipment: the use of innovation pollution-free techniques when utilizing RSW in cryolitic zones]. *Ekologicheskij vestnik Rossii*, 2012, no. 1, pp. 29–33.
27. Troyan N.S. Sposob zashchity gornyykh vyrabotok ot proryva vody so storony vodotoka v usloviyakh vechnoy merzloty [Defence method for mining outputs against water breakthrough on the side of streamflow under permafrost conditions]. Patent RF no. 2394962, 2010.
28. Oreshkin D.V., Frolov A.A., Ippolitov V.V. *Problemy teploizolyatsionnykh tamponazhnykh materialov dlya usloviy mnogoletnikh merzlykh porod* [Problems of heat insulating grouting materials for permafrost rocks]. Moscow, Nedra-Biznesstsent Publ., 2004. 236 p.
29. Ovchinnikov V., Kuznetsov V., Frolov A., Gazgireev Yu. Oblegchenny tamponazhnyy tsement dlya nizkotemperaturnykh skvazhin [Light grouting cement for low temperature boreholes]. *Burenie i nef't*, 2004, no. 5, pp. 32–33.
30. Oreshkin D.V. Oblegchennyye i sverkhlegkie tamponazhnyye rastvory dlya krepleniya neftegazovykh skvazhin [Light and extralight grouting compounds for strengthening oil-and-gas wells]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2010, no. 10, pp. 34–36.
31. Oreshkin D.V., Bliznyukov V.Yu. Sovremennyye tendentsii razrabotki universalnykh sverkhlegkikh tamponazhnykh rastvorov dlya usloviy ANPD i MMP [Modern trends when developing universal extralight grouting mixtures under APRP and permafrost conditions]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2007, no. 2, pp. 49–56.
32. Oreshkin D.V., Ippolitov V.V., Frolov A.A., Pervushin G.N. *Syrevaya smes dlya polucheniya teplozashchitnogo tamponazh'nogo materiala dlya usloviy mnogoletnikh merzlykh porod* [Raw mixture for obtaining heat-protecting material for permafrost regions]. Patent RF no. 2267004, 2005.
33. Oreshkin D.V., Yankevich V.F., Pervushin G.N. Problemy krepleniya stenok pri stroitelstve neftyanykh i gazovykh skvazhin [Problems of wall lining when building oil-and-gas wells]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2002, no. 7–8, pp. 43–46.
34. Oreshkin D.V., Belyaev K.V., Semenov V.S., Kretova U.E., Makarenkova Yu.V. *Syrevaya smes dlya polucheniya oblegchennogo tamponazh'nogo rastvora* [Raw mixture for obtaining light grouting composition]. Patent RF no. 2472835, 2013.
35. Medvedev Yu.V. Effektivnoe reshenie dlya tamponirovaniya skvazhin v novykh neftepromyslovnykh rajonakh [Effective solution for well squeezing in newly discovered oil producing areas]. *Nef't. Gaz. Novatsii*, 2013, no. 3, pp. 38–40.
36. Rechapov D.A., Korostelev A.S., Kuznetsov V.G. Effektivnost primeneniya arkticheskikh tamponazhnykh sistem v intervalakh zaleganiya merzlykh porod [Efficiency of application of Arctic grouting systems in frozen rocks gross intervals]. *Trudy 10 Mezhdunarodnoy konferentsii po merzlotovedeniyu (TICOP 2012)* [Materials of the 10<sup>th</sup> International conference on permafrost study]. Salekhard, 25–29 June, 2012. Vol. 5, pp. 261.

37. Yakovlev A.A. Analiz usloviy nadezhnogo tamponirovaniya skvazhin gazozhidkostnymi tamponazhnymi smesyami [Analysis of condition of effective grouting of wells with liquid-gas grouting mixtures]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2012, vol. 197, pp. 71–74.
38. Tolkachev G.M., Shilov A.M., Kozlov A.S., Pastuhov A.M. *Tamponazhny material* [Grouting material]. Patent RF no. 2460754, 2012.
39. Anisimov A.A., Simonenko L.I., Zlotnikov G.P., Pogorelov E.V., Gukasova N.M., Budovkina L.S. *Rasshiryayushchiysya tamponazhny sostav dlya nizkotemperaturnykh skvazhin* [Enhancing backfill composition for low temperature boreholes]. Patent RF no. 2155263, 2000.
40. Oreshkin D.V., Pervushin G.G. Izmenenie vlazhnosti i teploprovodnosti tsementnogo tamponazhnogo kamnya s polymi steklyannymi mikrosferami vo vremeni [Change in moisture and thermal conductivity of cement with cavate glass microspheres over time. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2003, no. 2, pp. 41–43.
41. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Panov A.V., Miroshnichenko N.A., Chynybaev M.K. Otsenka sokhrannosti zashchitnogo pokrytiya khvostohranilishcha rudnika Kumtor (Kyrgyzskaya Respublika) na osnove resheniya obratnoy zadachi po dannym izmereniya davleniya v nablyudatelnykh skvazhinakh [Estimate of integrity of resistant coating at the tailing storage of Kumtor mine (the Kyrgyz Republic) based on the inverse problem solution using the data of pressure survey in observation wells]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 34–37.
42. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Dzhamanbaev M.D., Chynybaev M.K. Evolution of thermohydrodynamic fields at tailings dam at Kumtor mine (Kyrgyz Republic). *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 17–22.
43. Buisikh A.A., Zamoshch M.N. Prediction of thermal regime within a tailing dump under permafrost. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 28–33.
44. Aleshin Yu.G., Torgoev I.A., Chukin B.A. Riski na uchastkakh zalozheniya vysokogomnykh khvostohranilishch (vnutrenniy Tyan-Shan): identifikatsiya v protsesse ekspluatatsii [Risks at the sites of mountain tailing dams (inner Tien Shan): identification in the process of exploitation]. *Problemy snizheniya prirodnykh opasnostey i riskov. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Georisk–2012»* [Problems of reducing natural perils and risks. Proc. International scientific and practical conference]. Moscow, 18–19 October 2012. Vol. 2, pp. 6–14.
45. Khrustalev L.N. Analysis of the warming of frozen soil around a cooling column after its disconnection. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2001, vol. 38, no. 2, pp. 69–73.
46. Canino M.C., Starling Iii C.H., Endo W.K., Gault J. Jet grouting to construct a seepage cutoff around a spillway. Association of State Dam Safety Officials – Dam Safety 2006. *Proceedings from the 2006 Annual Conference*. 2006. pp. 220–239.
47. Isfeld A.C. Numerical modelling of grout injection in stone masonry walls. *Masonry International*, 2016, vol. 29, no. 3, pp. 73–84.
48. Isfeld A.C., Moradabadi E., Laefer D.F., Shrive N.G. Uncertainty analysis of the effect of grout injection on the deformation of multi-wythe stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 126, pp. 661–672.
49. Xiang J., Wang T., Ni K., Wan L., Shi Y., Hu W. Geological factors and its treatment measures of dams anti-seepage grouting curtain at Wudongde hydropower station. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, vol. 48, no. 5, pp. 1581–1588.
50. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 2014, vol. 51, pp. 229–245.
51. Barr L.A., Sobkowicz J.C., Kwok C., Armstrong R., Henderson J. Design and construction of a seepage cut off wall using the slurry trench technique in cold temperatures at the Horizon Dam project. *Canadian Geotechnical Conference*, 2010, vol. 63, pp. 735–741.
52. Joshi P., McLeod H. Effectiveness of geomembrane liners in minimizing seepage in tailings storage facilities – New knowledge. *26<sup>th</sup> International Congress on Large Dams*. Vienna, Austria, 4–6 July, 2018. pp. 368–381.
53. Rombough V.T., Davies J.A., Hoy J.P. Grout curtain installation for sump excavation in permafrost region of Northern Canada. *Geotechnical Special Publication*, 2017, pp. 106–115.
54. Bruce D.A., Dreese T.L., Heenan D.M. Design, construction, and performance of seepage barriers for dams on carbonate foundations. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 183–193.
55. Byle M.J., Dery-Chamberland D., Bowman P., Dubeau M. Mixed grouting methods and materials for under-seepage mitigation at Barrage des Quinze Dam, Quebec, Canada. *Geotechnical Special Publication*, 2017, pp. 58–66.
56. Gazzarrini P., Siu D., Jungaro S. Construction of a jet-grouted backup seepage cut-off wall in the John Hart North Earthfill Dam. *Geotechnical Special Publication*, 2017, pp. 92–101.
57. Niermann M.J., Jenevein D.R., Worst S.L. Jet grouting for water cutoff and excavation support. *Geotechnical Special Publication*, 2017, pp. 124–134.
58. Canoglu M.C. Selection of suitable dam axis location considering permeability and grout curtain optimization. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 15–25.
59. Wang F., Shi M., Liu W., Zhong Y., Wang X. *Polymer grouting method for constructing ultra-thin anti-seepage wall*. Patent USA no. 20140314498, 2014.
60. Deng M.J. Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, vol. 34, no. 6, pp. 985–996.
61. Hu J.H., Wang R., Hu M.J., Zhou K.P. Test and mechanism of horizontal plastic drain in permafrost regions embankment. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2009, vol. 40, no. 5, pp. 1451–1456.
62. Xuefu Z., Yaonan Z. Study on a new-styled measure for treating water leakage of the permafrost tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, vol. 21, no. 6, pp. 656–667.
63. Shen Z., Qiu L., Zhou H. Review of seepage control of earth-rockfill dams on thick overburden layer. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, vol. 35, no. 5, pp. 27–35.
64. Hinchberger S., Weck J., Newson T. Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, vol. 47, no. 4, pp. 461–471.
65. Gancarz P.M., Minturn J.E., Grobler N.J., Van Dyk D. Polymer emulsion grouting for water cutoff in tunnel structures. *Geotechnical Special Publication*, 2017, pp. 295–302.
66. Guo C., Chu X., Wang F. The feasibility of non-water reaction polymer grouting technology application in seepage prevention for tailings reservoirs. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 203–213.

Received 13 March 2020.

#### Information about the authors

**Nikolay V. Yurkevich**, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics.

**Natalia V. Yurkevich**, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics.

**Vadim N. Gureyev**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics; Novosibirsk State Technical University.

**Nikolay A. Mazov**, Cand. Sc., head of the information-analytic center, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics.

УДК 621.311

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СУШКА ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МАЛОЙ ГЛУБИНОЙ ПРОНИКНОВЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОСБРОСА РАДИАЦИЕЙ И КОНВЕКЦИЕЙ. III. СТАДИЯ ПАДАЮЩЕЙ СКОРОСТИ СУШКИ

Саломатов Владимир Васильевич<sup>1,2</sup>,  
salomatov.vv@mail.ru

Карелин Вадим Александрович<sup>1,2</sup>,  
vad2hen@mail.ru

Саломатов Василий Владимирович<sup>2</sup>,  
vvsalomatov@mail.ru

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

**Актуальность** исследования продиктована необходимостью разработки математических моделей СВЧ-нагрева и МВ-сушки влажных материалов для получения технологически оптимальных и экономически выгодных режимов. Настоящая публикация является продолжением статей тех же авторов в «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов», в которой с помощью математического моделирования подробно был изучен процесс на первой и второй стадиях сушки – стадии прогрева, когда теплообмен между поверхностью влажного тела и окружающей средой осуществляется за счет радиации и конвекции, а СВЧ-энергия поглощается поверхностным слоем из-за малой её глубины проникновения, а также стадии постоянной скорости сушки. Построены асимптотические решения этой нелинейной задачи для малых и больших значений безразмерного времени, востребованные инженерной практикой, как для параметрического анализа, так и для проведения оперативных расчетов. Подход, связанный с рассмотрением третьей стадии – стадии падающей скорости сушки, основан на установлении базового уравнения сушки, которое обеспечивает взаимосвязь между теплообменом и влагообменом с помощью критерия Ребиндера.

**Цель:** постановка задачи третьего этапа СВЧ-сушки влажного материала – этапа падающей скорости сушки – и реализация теоретического решения по определению распределения температурного поля по толщине слоя и величины скорости сушки.

**Объектом** исследования является плоский слой влажного материала – уголь, песок, древесина и др. капиллярно-пористые массивы, на которые воздействует СВЧ-излучение. Такие материалы обладают высокой диэлектрической проницаемостью и как следствие весьма эффективно поглощают СВЧ-излучение, которое почти на 100 % преобразуется в тепловую энергию.

**Методы** исследования связаны с математическим моделированием, в основе которых лежат уравнения электродинамики Максвелла и теплового переноса А.В. Лыкова. В данной статье при оценке параметров теплового переноса учет теплообмена ведется более детально, нежели массообмена. Также одной из особенностей данной задачи электромагнитной сушки является рассмотрение материалов с малой глубиной поглощения, в силу чего в системе уравнений для нагрева источниковый член находится в граничном условии.

В результате исследований были определены температура и влагосодержание подсушиваемого тела в режиме падающей скорости сушки, получены расчетные соотношения аналитического характера для малых и больших параметров времени.

### Ключевые слова:

СВЧ-излучение, электромагнитная сушка, капиллярно-пористый массив, теплоизлучение, конвекция, уравнение теплового переноса А.В. Лыкова, стадия падающей скорости сушки.

### Введение

Известно, что СВЧ-излучение представляет собой электромагнитные волны с частотой от 300 МГц до 30 ГГц, с длиной волны от 1 мм до 1 м. Практически до недавнего времени использование микроволновой энергии как в промышленности, так и в быту было ограничено из-за дороговизны СВЧ-техники [1–4]. Усовершенствование технологий производства микроволновых приборов привело к широкому распространению устройств на основе СВЧ-энергии, в качестве которых выступают микроволновые печи, спутниковые антенны, сотовые смартфоны и др. Особо востребовано СВЧ-излучение для генерации тепла и электромагнитной сушки [5–12]. Физика нагрева микроволнами связана, прежде всего, с воздействием

электромагнитного излучения на полярные молекулы, главным образом воды, которые под воздействием высокочастотного внешнего электрического поля начинают активно колебаться, затрагивая соседние молекулы. В результате чего происходит регулируемый диэлектрический нагрев, температура материала повышается. За счет фазового перехода «вода–пар» идет обезвоживание, возникают градиенты температуры и влагосодержания, направления которых совпадают, что интенсифицирует сушку [13, 14].

Исключительная роль в процессе электромагнитной сушки принадлежит такому свойству материала, как диэлектрическая проницаемость. Главная особенность поведения данной характеристики заключается в том, что её максимум достигается при частотах,

соответствующих СВЧ-диапазону. Изменение уровня диэлектрической проницаемости сильнейшим образом зависит от влажности. Его величина составляет для сухих материалов порядка нескольких единиц, а с повышенной влажностью – порядка сотни единиц. Такое поведение диэлектрической проницаемости не только обеспечивает удаление влаги из продукта, но и выравнивает влажность по объему [15–18]. На данный момент с помощью микроволнового излучения решаются актуальные задачи в таких отраслях промышленности, как химическая, строительная, деревообрабатывающая, энергетическая и др. В области производства стройматериалов СВЧ-технологии применяются при изготовлении кирпича, а также в процессах сушки древесины, лекарственных растений и т. д.

Перейдем к рассмотрению заключительной стадии сушки – стадии падающей скорости. Важно отметить, в периоде падающей скорости интенсивность теплообмена  $q_n$  и интенсивность сушки  $j_n$  непрерывно уменьшаются по времени. Важнейшими критериями для этой стадии выступают теплообменный и массообменный критерии Кирпичева [19, 20]

$$Ki_q(t) = \frac{q_n(t)l}{\lambda T_c}, \quad Ki_m = \frac{j_n(t)l}{a_m \rho_0 u_0}.$$

Между  $Ki_q(t)$  и  $Ki_m(m)$  для данной стадии существует связь в следующей критериальной форме

$$Ki_q(t) = Ki_m(t) Lu Ko (1 + Rb),$$

где  $Rb = \frac{c}{r} \left( \frac{dT}{du} \right)$  – критерий Ребиндера.

Ниже будут построены асимптотические решения нелинейной задачи тепло-влажноперевода для малых и больших безразмерных времен  $Fo$ . При этом используется следующее свойство интегрального преобразования Лапласа. Большим значениям параметра преобразования Лапласа  $s$  соответствуют малые значения  $Fo$ , и наоборот – малым значениям параметра преобразования  $s$  соответствуют большие значения  $Fo$ .

Задача периода падающей скорости сушки для изменений полй безразмерной температуры и влагосодержания выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \Theta(X, Fo)}{\partial Fo} - (1 + \varepsilon Ko Pn Lu) \frac{\partial^2 \Theta(X, Fo)}{\partial X^2} - \varepsilon Ko Lu \frac{\partial U^2(X, Fo)}{\partial X^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U(X, Fo)}{\partial Fo} = Lu \frac{\partial^2 U(X, Fo)}{\partial X^2} - Pn Lu \frac{\partial^2 \Theta(X, Fo)}{\partial X^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta(1, Fo)}{\partial X} + Ki_q(Fo) - (1 - \varepsilon) Lu Ko Ki_m(Fo) = 0, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial U(1, Fo)}{\partial X} + Pn \frac{\partial \Theta(1, Fo)}{\partial X} + Ki_m(Fo) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, Fo)}{\partial X} = 0; \quad \frac{\partial U(0, Fo)}{\partial X} = 0; \quad (5)$$

$$\Theta(X, 0) = \bar{\Theta}_0; \quad U(X, 0) = \bar{U}_0, \quad (6)$$

где введены следующие критерии тепловлажноперевода:

$$Lu = \frac{a_m}{a} \text{ – критерий Лыкова;}$$

$$Ko = \frac{r \Delta u}{c \Delta T} \text{ – критерий Коссовича;}$$

$$Pn = \frac{\delta \Delta T}{\Delta u} \text{ – критерий Поснова;}$$

$$Rb = \frac{c b}{r} \text{ – критерий Ребиндера;}$$

$$Ki_q = \frac{q_n R_v}{\lambda T_c} \text{ – теплообменный критерий Кирпичева;}$$

$$Ki_m = \frac{j_n R_v}{a_m \rho_0 u_0} \text{ – массообменный критерий Кирпичева.}$$

#### Асимптотика для малых чисел Фурье (больших значения параметра преобразования Лапласа $s$ )

Представим решение задачи в изображениях (1)–(6) через передаточные функции:

$$\Theta_L(X, s) - \frac{\bar{\Theta}_0}{s} \approx Ki_{qL}(s) P_1(X, s) + Ki_{mL}(s) P_2(X, s);$$

$$U_L(X, s) - \frac{\bar{U}_0}{s} \approx Ki_{qL}(s) M_1(X, s) + Ki_{mL}(s) M_2(X, s), \quad (7)$$

где  $P_1, P_2, M_1, M_2$  – передаточные функции. Представим их в виде разложения по большому параметру  $s$  в виде:

$$P_1(X, s) \approx \varphi_0(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \varphi_1(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots$$

$$P_2(X, s) \approx \psi_0(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \psi_1(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots$$

$$M_1(X, s) \approx \chi_0(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \chi_1(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots$$

$$M_2(X, s) \approx \nu_0(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \nu_1(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \quad (8)$$

Также введем обозначения:

$$Y_1 = 1 + \varepsilon Ko Pn Lu;$$

$$Y_2 = -\varepsilon Ko Lu.$$

Представим (1) в изображениях по Лапласу:

$$s \left( \Theta_L - \frac{\bar{\Theta}_0}{s} \right) = Y_1 \Theta_L'' + Y_2 U_L''. \quad (9)$$

Найдем  $\Theta_L'', U_L''$ :

Дифференцируя (7), имеем:

$$\Theta_L'' \approx Ki_{qL}(s) \left[ \varphi_0''(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \varphi_1''(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right] +$$

$$+ Ki_{mL}(s) \left[ \psi_0''(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \psi_1''(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right]$$

$$U_L'' \approx Ki_{qL}(s) \left[ \chi_0''(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \chi_1''(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right] +$$

$$+ Ki_{mL}(s) \left[ \nu_0''(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \nu_1''(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right] \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), запишем:

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{aligned} & Ki_{qL}(s) \left( \varphi_0(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \varphi_1(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right) + \\ & + Ki_{mL}(s) \left( \psi_0(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \psi_1(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right) \end{aligned} \right] = \\ & = Y_1 \left[ \begin{aligned} & Ki_{qL}(s) \left[ \varphi_0''(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \varphi_1''(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right] + \\ & + Ki_{mL}(s) \left[ \psi_0''(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \psi_1''(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right] \end{aligned} \right] + \\ & + Y_2 \left[ \begin{aligned} & Ki_{qL}(s) \left[ \chi_0''(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \chi_1''(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right] + \\ & + Ki_{mL}(s) \left[ \nu_0''(X, s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} + \nu_1''(X, s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} + \dots \right] \end{aligned} \right]. \end{aligned}$$

Группируя члены, получим следующие уравнения:

$$\text{Слагаемые при } Ki_{qL}(s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} : s\varphi_0 = Y_1\varphi_0'' + Y_2\chi_0'';$$

$$\text{Слагаемые при } Ki_{qL}(s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} : s\varphi_1 = Y_1\varphi_1'' + Y_2\chi_1'';$$

$$\text{Слагаемые при } Ki_{mL}(s) \frac{e^{-\sqrt{s}}}{\sqrt{s}} : s\psi_0 = Y_1\psi_0'' + Y_2\nu_0'';$$

$$\text{Слагаемые при } Ki_{mL}(s) \frac{e^{-2\sqrt{s}}}{s} : s\psi_1 = Y_1\psi_1'' + Y_2\nu_1''.$$

Для первого члена разложения можно записать систему:

$$\begin{aligned} & s\varphi_0 = Y_1\varphi_0''; \\ & \varphi_0'(0, s) = 0; \\ & \varphi_0'(1, s) = -\frac{\sqrt{s}}{e^{-\sqrt{s}}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Решая систему (11), имеем (12):

$$\varphi_0(X, s) = -\frac{e^{\sqrt{s} + \sqrt{\frac{s}{Y_1}} - \sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \left( 1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{Y_1}}{-1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}}}}. \quad (12)$$

Аналогично для  $\psi_0$  получаем систему (13):

$$\begin{aligned} & s\psi_0 = Y_1\psi_0'' \\ & \psi_0'(0, s) = 0 \\ & \psi_0'(1, s) = \frac{\sqrt{s}}{e^{-\sqrt{s}}} (1 - \varepsilon) LuKo \end{aligned} \quad (13)$$

решением которой является (14):

$$\psi_0(X, s) = (1 - \varepsilon) LuKo \frac{e^{\sqrt{s} + \sqrt{\frac{s}{Y_1}} - \sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \left( 1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{Y_1}}{-1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}}}}. \quad (14)$$

В итоге с учетом первого члена разложения для изображения температуры и связь  $Ki_{qL}$  и  $Ki_{mL}$  имеем:

$$\begin{aligned} \Theta_L(X, s) - \frac{\bar{\Theta}_0}{s} & \approx Ki_{qL}(s) \frac{\left( \frac{e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}} - \sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \left( 1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{Y_1}}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} \right)}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} + \\ & + Ki_{mL}(s) (1 - \varepsilon) LuKo \frac{\left( \frac{e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}} - \sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \left( 1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{Y_1}}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} \right)}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} = \\ & = \frac{\left( \frac{e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}} - \sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \left( 1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{Y_1}}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} \right)}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} \times \\ & \times \left[ -Ki_{qL}(s) + Ki_{mL}(s)(1 - \varepsilon) LuKo \right] = \\ & = \frac{\left( \frac{e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}} - \sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \left( 1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{Y_1}}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} \right)}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} \left[ -Ki_{qL}(s) + Ki_{qL}(s) \frac{1 - \varepsilon}{1 + Rb} \right] = \\ & = Ki_{qL} \left( -1 + \frac{1 - \varepsilon}{1 + Rb} \right) \frac{\left( \frac{e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}} - \sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \left( 1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{Y_1}}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} \right)}{\left( -1 + e^{2\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}}. \end{aligned}$$

Данное решение можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Theta_L(X, s) - \frac{\bar{\Theta}_0}{s} & \approx \\ & \approx Ki_{qL} \left( -1 + \frac{1 - \varepsilon}{1 + Rb} \right) \frac{\left( \frac{e^{-\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} + e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{Y_1}}{\left( -e^{-\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} + e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X} \right) \sqrt{s}} = \\ & = Ki_{qL} \left( -1 + \frac{1 - \varepsilon}{1 + Rb} \right) \frac{ch\left(\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X\right)}{\sqrt{\frac{s}{Y_1}} \cdot sh\left(\sqrt{\frac{s}{Y_1}}\right)}. \end{aligned} \quad (15)$$

При больших  $s$ :

$$\frac{1}{sh\left(\sqrt{\frac{s}{Y_1}}\right)} \approx 2e^{-\sqrt{\frac{s}{Y_1}}};$$

$$\Theta_L(X, s) - \frac{\bar{\Theta}_0}{s} \approx Ki_{qL} \left( -1 + \frac{1 - \varepsilon}{1 + Rb} \right) \frac{ch\left(\sqrt{\frac{s}{Y_1}} X\right)}{\sqrt{\frac{s}{Y_1}}} 2e^{-\sqrt{\frac{s}{Y_1}}}.$$

Найдем обратное преобразование Лапласа от

$$\frac{ch\left(\sqrt{\frac{s}{Y_1}}X\right)}{\sqrt{\frac{s}{Y_1}}} 2e^{-\sqrt{\frac{s}{Y_1}}}$$

$$L^{-1}\left(\frac{ch\left(\sqrt{\frac{s}{Y_1}}X\right)}{\sqrt{\frac{s}{Y_1}}}\right) = L^{-1}\left(\frac{e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}}X} + e^{-\sqrt{\frac{s}{Y_1}}X}}{\sqrt{\frac{s}{Y_1}}}\right) =$$

$$= L^{-1}\left(\frac{e^{\sqrt{\frac{s}{Y_1}}(X-1)} + e^{-\sqrt{\frac{s}{Y_1}}(X+1)}}{\sqrt{\frac{s}{Y_1}}}\right) = \left(e^{\frac{(1-X)^2}{4FoY_1}} + e^{\frac{(X+1)^2}{4FoY_1}}\right) \sqrt{\frac{Y_1}{\pi Fo}}$$

Для нахождения оригинала от (15) воспользуемся теоремой о свертке:

$$\Theta(X, Fo) \approx \left(1 + \frac{1-\varepsilon}{1+Rb}\right) \sqrt{Y_1} \int_0^{Fo} Ki_q(\eta) \times$$

$$\times \left[ \left( e^{\frac{(1-X)^2}{4(Fo-\eta)Y_1}} + e^{\frac{(X+1)^2}{4(Fo-\eta)Y_1}} \right) \frac{1}{\sqrt{\pi(Fo-\eta)}} \right] d\eta + \dots$$

Для раскрытия интеграла разложим  $Ki_q(\eta)$  в ряд Тейлора:

$$Ki_q(\eta) \approx Ki_q(Fo) + (\eta - Fo) Ki'_q(Fo) + \dots$$

Также учтем:

$$Ki_q(\eta) = Ki_w - Sk[\Theta_w^4 - 1] - Bi[\Theta_w - 1].$$

В результате получим

$$\Theta(X, Fo) \approx \left(1 + \frac{1-\varepsilon}{1+Rb}\right) (Ki_w - Sk[\Theta_w^4 - 1] - Bi[\Theta_w - 1]) \times$$

$$\times \sqrt{Y_1} \int_0^{Fo} \left[ \left( e^{\frac{(1-X)^2}{4(Fo-\eta)Y_1}} + e^{\frac{(X+1)^2}{4(Fo-\eta)Y_1}} \right) \frac{1}{\sqrt{\pi(Fo-\eta)}} \right] d\eta + \dots$$

Проводя дальнейшее интегрирование, запишем температурную асимптотику для малых чисел Фурье с учетом первого члена разложения

$$\Theta(X, Fo) \approx \left(1 + \frac{1-\varepsilon}{1+Rb}\right) \frac{(Ki_w - Sk[\Theta_w^4 - 1] - Bi[\Theta_w - 1])}{24Y_1^{\frac{1}{4}}} \times$$

$$\times \left[ (1+X)^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{(1+X)\sqrt{Fo}}{2\sqrt{Y_1}}\right) + \right.$$

$$\left. + (1-X)^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{(1-X)\sqrt{Fo}}{2\sqrt{Y_1}}\right) \right] + \dots$$

Подставляя  $X=1$ , получим уравнение четвертой степени для поверхностной температуры (16):

$$\Theta_w \approx \left(1 + \frac{1-\varepsilon}{1+Rb}\right) \times$$

$$\times \frac{(Ki_w - Sk[\Theta_w^4 - 1] - Bi[\Theta_w - 1])}{3Y_1^{\frac{1}{4}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{Fo}}{\sqrt{Y_1}}\right). \quad (16)$$

В итоге действительный положительный корень данного уравнения можно записать так

$$\Theta_w \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{3}} D}{F} + \frac{F}{2^{\frac{1}{2}} 3^{\frac{2}{3}} B}} -$$

$$- \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{3}} D}{F} - \frac{F}{2^{\frac{1}{2}} 3^{\frac{2}{3}} B} - \frac{2C}{B \sqrt{\frac{4\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{3}} D}{F} + \frac{F}{2^{\frac{1}{2}} 3^{\frac{2}{3}} B}}}}};$$

$$F = \left(9BC^2 + \sqrt{3}\sqrt{27B^2C^4 - 256B^3D^3}\right)^{\frac{1}{3}};$$

$$D = -A - B - C + 1;$$

$$C = A_0 Bi \left(1 - 2\sqrt{\frac{Fo}{\pi Y_1}}\right) + 1;$$

$$B = A_0 Sk \left(1 - 2\sqrt{\frac{Fo}{\pi Y_1}}\right);$$

$$A = A_0 Ki_w \left(1 - 2\sqrt{\frac{Fo}{\pi Y_1}}\right);$$

$$A_0 = \frac{\left(1 + \frac{1-\varepsilon}{1+Rb}\right)}{3Y_1^{\frac{1}{4}}}.$$

Зная граничную температуру, окончательно можно определить температурное распределение для малых чисел Фурье с учетом первого члена разложения:

$$\Theta(X, Fo) \approx \left(1 + \frac{1-\varepsilon}{1+Rb}\right) \frac{(Ki_w - Sk[\Theta_w^4 - 1] - Bi[\Theta_w - 1])}{24Y_1^{\frac{1}{4}}} \times$$

$$\times \left[ (1+X)^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{(1+X)\sqrt{Fo}}{2\sqrt{Y_1}}\right) + \right.$$

$$\left. + (1-X)^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{(1-X)\sqrt{Fo}}{2\sqrt{Y_1}}\right) \right] + \dots$$

**Асимптотика при больших Fo (малые значения параметра преобразования Лапласа s)**

Представим решение  $\Theta_L(X, s)$  через передаточные функции  $P_1$  и  $P_2$  (17)

$$\Theta_L(X, s) = Ki_{qL}(s)P_1(X, s) + Ki_{mL}(s)P_2(X, s), \quad (17)$$

которые разложим в ряд по малому параметру  $s$  (18), (19)

$$P_1(X, s) \approx \varphi_0(X, s) + s\varphi_1(X, s) + s^2\varphi_2(X, s) + \dots \quad (18)$$

$$P_2(X, s) \approx \psi_0(X, s) + s\psi_1(X, s) + s^2\psi_2(X, s) + \dots \quad (19)$$

Аналогично для  $U(x, s)$  выразим (20)

$$U(X, s) = Ki_{qL}(s)M_1(X, s) + Ki_{mL}(s)M_2(X, s) \quad (20)$$

и представим передаточные функции  $M_1$  и  $M_2$  также в виде разложений в ряд по малому параметру  $s$  (21), (22)

$$M_1(X, s) = \chi_0(X, s) + s\chi_1(X, s) + s^2\chi_2(X, s) + \dots \quad (21)$$

$$M_2(X, s) = \nu_0(X, s) + s\nu_1(X, s) + s^2\nu_2(X, s) + \dots \quad (22)$$

Подставляя данные разложения в основное уравнение (9) и приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях  $s$ , имеем следующую систему для определения сомножителей  $\varphi_0, \psi_0, \varphi_1, \psi_1 \dots$

$$\varphi_0'' = 0; \quad (23)$$

$$\varphi_1'' - Y_1\varphi_0 = 0; \quad (24)$$

$$\psi_0'' = 0; \quad (25)$$

$$\psi_1'' - Y_1\psi_0 = 0. \quad (26)$$

Данные системы уравнений второго порядка при интегрировании требуют задания двух граничных условий для нахождения двух констант интегрирования. Первая константа найдётся из условия симметрии.

$$\varphi_0'(0, s) = 0; \quad (27)$$

$$\varphi_1'(0, s) = 0; \quad (28)$$

$$\psi_0'(0, s) = 0; \quad (29)$$

$$\psi_1'(0, s) = 0. \quad (30)$$

Вторую константу найдем из следующего интегрального условия:

$$\int_0^1 s\varphi_0 dx = 1; \quad (31)$$

$$\int_0^1 \varphi_0'' dx = Y_1 \int_0^1 \varphi_0 dx; \quad (32)$$

$$\int_0^1 s\psi_0 dx = 1; \quad (33)$$

$$\int_0^1 \psi_0'' dx = Y_1 \int_0^1 \psi_0 dx. \quad (34)$$

Решая систему (23)–(26) с учетом (27)–(30) и (31)–(34), имеем асимптотику решения с учетом двух членов разложения:

$$\begin{aligned} \Theta(X, Fo) = & \int_0^{Fo} Ki_q(\eta) d\eta - Ki_q(Fo) \times Y_1 \left( \frac{X^2}{2} - 1 \right) + \\ & + (1 - \varepsilon) \times PnLuKo \int_0^{Fo} Ki_m(\eta) d\eta + Ki_m(Fo) \times \\ & \times Y_1 \left( \frac{X^2}{2} - (1 - \varepsilon) LuKo \right) + \dots \end{aligned} \quad (35)$$

Используя известную для стадии падающей скорости сушки связь между теплообменным и массообменным критерием Кирпичева (36)

$$Ki_q(Fo) = Ki_m(Fo) LuKo(1 + Rb), \quad (36)$$

где  $Ki_q = \frac{q_n(t)Rv}{\lambda T_c}$ ,  $Ki_m = \frac{j_n(t)Rv}{a_m \rho_0 \bar{u}_0}$ .

Представим (35) в следующем виде:

$$\Theta(X, Fo) - \bar{\Theta}_0 \approx z_1 \int_0^{Fo} Ki_q(\eta) d\eta + z_2 Ki_q(Fo) + \dots \quad (37)$$

где

$$z_1 = \left[ 1 + \frac{(1 - \varepsilon) Pn}{1 + Rb} \right], \quad z_2 = Y_1 \left[ 1 - \frac{X^2}{2} + \frac{X^2 - (1 - \varepsilon) LuKo}{LuKo(1 + Rb)} \right].$$

Для расчета по (37) вначале необходимо определить температуру на поверхности при  $x=1$   $\Theta(1, Fo) = \Theta_w$ . Полагая в (37)  $x=1$ , получим интегральное уравнение Вольтерра II рода (38)

$$\begin{aligned} \Theta_w = & z_1 \int_0^{Fo} [Ki_w - Sk(\Theta_w^4 - 1) - Bi(\Theta_w - 1)] d\eta + \\ & + z_2 [Ki_w - Sk(\Theta_w^4 - 1) - Bi(\Theta_w - 1)] + \dots \end{aligned} \quad (38)$$

$$\int_{\Theta_w^*}^{\Theta_w} \frac{1 + z_2 Bi + 4z_2 \Theta_w^3}{Ki_w - Sk(\Theta_w^4 - 1) - Bi(\Theta_w - 1)} d\Theta_w = z_1 (Fo - Fo^*). \quad (39)$$

Раскрывая интеграл (39), можно записать окончательное решение для  $\Theta_w$  в элементарных функциях (40)

$$z_1 (Fo - Fo^*) = F_1(\Theta_w) - F_1(\Theta_w^*), \quad (40)$$

где  $F_1$  имеет вид

$$\begin{aligned} F_1(\Theta_w) = & \frac{1}{4(Ki + Sk + Bi)^{\frac{3}{4}} Sk} \times \\ & \times \left( 2Sk^{\frac{3}{4}} (1 + Bi \cdot z_2) \operatorname{Arctan} \left[ \frac{Sk^{\frac{1}{4}} \Theta_w}{(Ki + Sk + Bi)^{\frac{1}{4}}} \right] - \right. \\ & - Sk^{\frac{3}{4}} (1 + Bi \cdot z_2) \times \\ & \times \left( \operatorname{Log} \left[ (Ki + Sk + Bi)^{\frac{1}{4}} - Sk^{\frac{1}{4}} \Theta_w \right] - \right. \\ & \left. \left. - \operatorname{Log} \left[ (Ki + Sk + Bi)^{\frac{1}{4}} + Sk^{\frac{1}{4}} \Theta_w \right] \right) - \right. \\ & \left. - 4(Ki + Sk + Bi)^{\frac{3}{4}} z_2 \operatorname{Log} \left[ (Ki + Sk + Bi) - Sk \Theta_w^4 \right] \right) \end{aligned}$$

Зная теперь температуру поверхности можно рассчитать и полное распределение температуры по сечению пластины по зависимости (37).

Для оценки влагосодержания необходимо знать зависимость между массообменным критерием Кирпичева и временем. Ее получение вызывает определенные трудности. Чтобы обойти их, нами принят следующий подход. Поле температур в третьей части, как и в двух предыдущих частях статьи, исследуется более детально. Влагосодержание изучается менее подробно, для чего привлекаются наиболее апробированные практикой экспериментально-корреляционные связи между определяющими параметрами. В результате имеем (41)

$$Ki_m(t) = \frac{l^2}{a_m(W_0 - W_p)} \frac{dw}{dt} = \frac{\chi N l^2}{a_m} \frac{W - W_p}{W_0 - W_p}, \quad (41)$$

где  $\chi$  – относительный коэффициент сушки, 1/%;  $N$  – скорость сушки, %/с;  $W$  – текущее влагосодержание, %;  $W_0$  – начальное влагосодержание, %;  $W_p$  – равновесное влагосодержание, %.

Переход от II стадии к III фиксируется достижением пластиной критического влагосодержания  $W_{кр}$  и равенством скоростей сушки, то есть (42)

$$\left. \frac{d\bar{w}}{dt} \right|_{II} = \left. \frac{d\bar{w}}{dt} \right|_{III} \quad (42)$$

В итоге имеем выражение для критического влагосодержания (43)

$$\bar{W}_{кр} = \bar{W} - W_p + \left( \frac{A}{1-\beta} \right)^{1/k} \quad (43)$$

где  $A$ ,  $\beta$ ,  $k$  – коэффициенты сушки;  $\bar{W}$ ,  $W_p$  – среднее текущее и равновесное влагосодержание, кг/кг.

Равновесие влагосодержания пластины, соответствующее параметрам окружающей среды, определяется по известному уравнению Ленгмюра (44).

$$W_p = [D - E(T_c - 273)] \left( \frac{\phi}{F + \phi} \right)^{0.5} \quad (44)$$

Здесь  $D$ ,  $E$ ,  $F$  – постоянные, зависящие от материала;  $\phi$  – относительная влажность среды.

Для III стадии скорость сушки определяется по формуле Г.К. Филоненко [21] (45).

$$\left. \frac{d\bar{w}}{dt} \right|_{III} = \left. \frac{d\bar{w}}{dt} \right|_{II} \frac{(\bar{W} - W_p)^k}{A + \beta(\bar{W} - W_p)} \quad (45)$$

### Заключение

В режиме падающей скорости сушки температура и влагосодержание подсушиваемого тела определяются взаимосвязью внутреннего и внешнего тепло-массообмена. В рассматриваемом в статье случае это требует интегрирования нелинейной системы поставленных уравнений. Получить расчетные соотношения приближенно-аналитического характера удалось построением асимптотических приближений для малых и больших чисел Фурье. При этом дополнительно использована связь между теплообменным и массообменным критерием Кирпичева через критерий Ребиндера. В итоге тепловая часть задачи доведена до интегралов, которые выражаются через элементарные функции. В работе процесс переноса тепла учитывался более детально, чем массы. Сама скорость сушки определена по аппроксимационной формуле Г.К. Филоненко, в которой равновесное влагосодержание определено по уравнению Ленгмюра.

*Исследование и постановка задачи для стадии падающей скорости сушки выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН, поиск приближенных аналитических решений выполнен за счет гранта РФФИ (№ 17-08-00752).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов Н.П. Технология деструкции бурых углей методом нагрева энергией сверхвысоких частот. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – 92 с.
2. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters / Yi-du Hong, Bai-quan Lin, He Li, Huaming Dai, Chuan-jie Zhu, HaoYao // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 93. – P. 1145–1154.
3. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: A coupled electromagnetic and heat transfer model / Baiquan Lin, He Li, Zhongwei Chen, Chunshan Zheng, Yidu Hong, ZhengWang // Applied Thermal Engineering. – 2017. – V. 126. – P. 949–962.
4. Meda V., Orsat V., Raghavan V. Microwave heating and the dielectric properties of foods. // Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. – 2017. – P. 23–43.
5. Microwave drying performance of single-particle coal slime and energy consumption analyses / Zhanlong Song, Chuanming Jing, Liansheng Yao, Xiqiang Zhao, Wenlong Wang, Yanpeng Mao, Chunyuan Ma // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 143. – P. 69–78.
6. Faisal Mushtaq, Ramli Mat, Farid Nasir Ani. Fuel production from microwave assisted pyrolysis of coal with carbon surfaces // Energy Conversion and Management. – 2016. – V. 110. – P. 142–153.
7. Drying behavior of lignite under microwave heating / Zhanlong Song, Liansheng Yao, Chuanming Jing, Xiqiang Zhao, Wenlong Wang & Chunyuan Ma // Drying Technology. – 2017. – V. 35. – P. 433–443.
8. Radha Raman Mishra, Apurbba Kumar Sharma. Microwave-material interaction phenomena: heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2016. – V. 81. – P. 78–97.
9. Temperature rise characteristics of Zhun Dong coal during microwave pyrolysis / Huan-Peng Liu, Tai-Ping Chen, Yang Li, Zhen-Yu Song, Shao-Wei Wang, Shao-Hua Wu // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 148. – P. 317–323.
10. Хайдурова А.А., Федчишин В.В., Коновалов Н.П. Микроволновая сушка бурых углей и повышение их технологических характеристик // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – С. 31–35.
11. Методы и системы для повышения свойств твердого топлива: пат. USA 2007/0295.590.
12. Effect of microwave irradiation on the preparation of iron oxide/arenaceous clay sorbent for hot coal gas desulfurization Yu Feng, Tianqi Hu, Mengmeng Wu, Ju Shanguan, Huilin Fan, Jie Mi // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 148. – P. 35–42.
13. Experimental study on the petrophysical variation of different rank coals with microwave treatment / He Li, Baiquan Lin, Wei Yang, Chunshan Zheng, Yidu Hong, Yabin Gao, Tong Liu, Shiliang Wu // International Journal of Coal Geology. – 2016. – V. 154–155. – P. 82–91.
14. Activated carbon obtained from sapelli wood sawdust by microwave heating for o-cresol adsorption. / P.S. Thue, G.S. dos Reis, E.C. Lima, J.M. Sieliechi, G.L. Dotto, A.G.N. Wamba, S.L.P. Dias, F.A. Pavan // Research on Chemical Intermediates. – February 2017. – V. 43. – Iss. 2. – P. 1063–1087.
15. Effect of microwave irradiation on petrophysical characterization of coals / Hong Yi-du, Lin Bai-quan, Zhu Chuan-jie, Li He // Applied Thermal Engineering. – 5 June 2016. – V. 102. – P. 1109–1125.
16. Jing Sun, Wenlong Wang, Qinyan Yue. Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies // Materials. – 2016. – P. 231. DOI: 10.3390/ma9040231.
17. Rajasekhar Reddy B., Vinu R. Microwave assisted pyrolysis of Indian and Indonesian coals and product characterization // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 154. – P. 96–103.
18. Microwave absorption characteristics of anthracite during pyrolysis / Zhiwei Peng, Xiaolong Lin, Xuejiao Wu, Jiann-Yang Hwang, Byoung-Gon Kim, Yuanbo Zhang, Guanghui Li, Tao Jiang // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 150. – P. 58–63.
19. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Изд-во «Высшая школа» 1967. – 600 с.
20. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Изд-во «Энергия», 1968. – 471 с.
21. Филоненко Г.К. Кинетика сушильных процессов. – М.: Обorongиздат, 1939. – 140 с.

Поступила 12.03.2020 г.

**Информация об авторах**

**Саломатов В.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета; главный научный сотрудник института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

**Карелин В.А.**, аспирант кафедры физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета; инженер-исследователь Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

**Саломатов В.В.**, кандидат физико-математических наук, ведущий программист Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

UDC 621.311

## ELECTROMAGNETIC DRYING OF WET MATERIALS WITH A SMALL DEPTH OF PENETRATION OF MICROWAVE RADIATION IN THE CONDITIONS OF HEAT REMOVAL BY RADIATION AND CONVECTION. III. STAGE OF FALLING DRYING RATE

**Vladimir V. Salomatov**<sup>1,2</sup>,  
salomatov.vv@mail.ru

**Vadim A. Karelin**<sup>1,2</sup>,  
vad2hen@mail.ru

**Vasily V. Salomatov**<sup>2</sup>,  
vvsalomatov@mail.ru

<sup>1</sup> Novosibirsk State University,  
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,  
1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is dictated by the need to develop mathematical models of microwave heating and MV-drying of wet materials to obtain technologically optimal and cost-effective modes. This publication is a continuation of the articles of the same authors in *The Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, in which using the mathematical modeling, the authors have studied in details the process at the first and second stages of drying – the heating stage, when heat exchange between the surface of a wet body and the environment occurs due to radiation and convection, and microwave energy is absorbed by the surface layer owing to its small penetration depth, as well as the stage of constant drying rate. The authors constructed the asymptotic solutions of this nonlinear problem for small and large values of dimensionless time, which are demanded by engineering practice, both for parametric analysis and for performing operational calculations. The approach associated with the consideration of the third stage – the stage of the falling drying rate, is based on determination of the basic drying equation, which provides the relationship between heat transfer and moisture exchange using the Rebinder criterion.

**The aim** of the research is to state the problem of the third stage of microwave drying of a wet material – the stage of a falling drying rate, and to implement a theoretical solution to determine temperature field distribution over the layer thickness and the drying rate.

**The object** of the research is a flat layer of wet material – coal, sand, wood, etc. capillary-porous arrays, which are affected by microwave radiation. Such materials have a high dielectric constant and, as a result, very effectively absorb microwave radiation, which is almost 100 % converted to thermal energy.

**The research methods** are associated with mathematical modeling, which are based on the equations of Maxwell's electrodynamics and heat and moisture transfer by A.V. Lykov. In this article, when assessing the parameters of heat and moisture transfer, heat transfer accounting is conducted in more details than mass transfer. One of the features of this problem is the consideration of materials with a small depth of absorption, whereby the source term in the system of equations for heating is in the boundary condition.

The temperature and moisture content of the body to be dried were determined in the mode of the falling drying speed, the calculated analytical ratios for small and large parameters of time were obtained.

### Key words:

Microwave radiation, electromagnetic drying, capillary-porous array, heat radiation, convection, A.V. Lykov heat-moisture transfer equation, stage of falling drying speed.

*The statement of the problem and the solution for the stage of falling drying rate were performed within the framework of the state task IT SB RAS, the search for approximate analytical solutions was done with the support of the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 17-08-00752.*

### REFERENCES

- Kononov N.P. *Tekhnologiya destruktivnoy burykh ugley metodom nagreva energiyey sverkhvysokikh chastot* [Technology of brown coal destruction by the method of heating with energy of ultrahigh frequencies]. Irkutsk, IrSTU Publ. house, 2000. 92 p.
- Yi-du Hong, Bai-quan Lin, He Li, Hua-ming Dai, Chuan-jie Zhu, Hao Yao. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters. *Applied Thermal Engineering*, 25 January 2016, vol. 93, pp. 1145–1154.
- Baiquan Lin, He Li, Zhongwei Chen, Chunshan Zheng, Yidu Hong, Zheng Wang. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: a coupled electromagnetic and heat transfer model. *Applied Thermal Engineering*, 5 November 2017, vol. 126, pp. 949–962.
- Meda V., Orsat V., Raghavan V. Microwave heating and the dielectric properties of foods. *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, 2017, pp. 23–43.
- Zhanlong Song, Chuanming Jing, Liansheng Yao, Xiqiang Zhao, Wenlong Wang, Yanpeng Mao, Chunyuan Ma. Microwave drying performance of single-particle coal slime and energy consumption analyses. *Fuel Processing Technology*, March 2016, vol. 143, pp. 69–78.
- Faisal Mushtaq, Ramli Mat, Farid Nasir Ani. Fuel production from microwave assisted pyrolysis of coal with carbon surfaces. *Energy Conversion and Management*, 15 February 2016, vol. 110, pp. 142–153.
- Zhanlong Song, Liansheng Yao, Chuanming Jing, Xiqiang Zhao, Wenlong Wang, Chunyuan Ma. Drying behavior of lignite under microwave heating. *Drying Technology*, 31 Jan 2017, vol. 35, pp. 433–443.
- Radha Raman Mishra, Apurbba Kumar Sharma. Microwave-material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, February 2016, vol. 81, pp. 78–97.

9. Huan-Peng Liu, Tai-Ping Chen, Yang Li, Zhen-Yu Song, Shao-Wei Wang, Shao-Hua Wu. Temperature rise characteristics of Zhun Dong coal during microwave pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, July 2016, vol. 148, pp. 317–323.
10. Khaidurova A.A., Fedchishin V.V., Konovalov N.P. Microwave drying of brown coals and increasing their technological characteristics. *Izv. Universities. Problems of energy*, 2010, pp. 31–35. In Rus.
11. *Methods and systems for improving the properties of solid fuels*. Patent USA 0295.590, 2007.
12. Yu Feng, Tianqi Hu, Mengmeng Wu, Ju Shangguan, Huilin Fan, Jie Mi. Effect of microwave irradiation on the preparation of iron oxide/arenaceous clay sorbent for hot coal gas desulfurization. *Fuel Processing Technology*, July 2016, vol. 148, pp. 35–42.
13. He Li, Baiquan Lin, Wei Yang, Chunshan Zheng, Yidu Hong, Yabin Gao, Tong Liu, Shiliang Wu. Experimental study on the petrophysical variation of different rank coals with microwave treatment. *International Journal of Coal Geology*, 15 January 2016, vol. 154–155, pp. 82–91.
14. Thue P.S., Dos Reis G.S., Lima E.C., Sieliechi J.M., Dotto G.L., Wamba A.G.N., Dias S.L.P., Pavan F.A. Activated carbon obtained from sapelli wood sawdust by microwave heating for o-cresol adsorption. *Research on Chemical Intermediates*, February 2017, vol. 43, Iss. 2, pp. 1063–1087.
15. Hong Yi-du, Lin Bai-quan, Zhu Chuan-jie, Li He. Effect of microwave irradiation on petrophysical characterization of coals. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 102, pp. 1109–1125.
16. Jing Sun, Wenlong Wang, Qinyan Yue. Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies. *Materials*, 2016 pp. 231. DOI: 10.3390/ma904023.
17. Rajasekhar Reddy B., Vinu R. Microwave assisted pyrolysis of Indian and Indonesian coals and product characterization. *Fuel Processing Technology*, 15 December 2016, vol. 154, pp. 96–103.
18. Zhiwei Peng, Xiaolong Lin, Xuejiao Wu, Jiann-Yang Hwang, Byoung-Gon Kim, Yuanbo Zhang, Guanghui Li, Tao Jiang. Microwave absorption characteristics of anthracite during pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, September 2016, vol. 150, pp. 58–63.
19. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p.
20. Lykov A.V. *Teoriya sushki* [The theory of drying]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 471 p.
21. Filonenko G.K. *Kinetika sushilnykh protsessov* [Kinetics of drying processes]. Moscow, Oboronizdat Publ., 1939. 140 p.

*Received: 12 March 2020.*

#### Information about the authors

**Vladimir V. Salomatov**, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State University; senior researcher, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

**Vadim A. Karelin**, postgraduate, Novosibirsk State University; engineer, SS. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

**Vasily V. Salomatov**, Cand. Sc., leading programmer, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

УДК 66.063.61

## ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ

**Афанасенко Виталий Геннадьевич<sup>1</sup>,**  
afanasenko.v.g@yandex.ru

**Кулаков Петр Алексеевич<sup>1</sup>,**  
petr20071@mail.ru

**Боев Евгений Владимирович<sup>1</sup>,**  
boev\_ugntu@fromru.com

**Имаева Эмма Шаукатовна<sup>1</sup>,**  
imaeva2014@yandex.ru

**Давлетов Олег Борисович<sup>1</sup>,**  
davolegus@mail.ru

**Мазидуллин Денис Нарисович<sup>1</sup>,**  
azidullindenis@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность исследования.** Процесс эмульгирования широко распространён в промышленности как при первичной обработке углеводородов, так на конечных стадиях получения товарных продуктов. Особый интерес вызывает организация процесса непрерывного получения стабильных эмульсий в аппаратах проточного типа перед непосредственным их применением. Такой подход существенно снижает величину отклонения концентрации смеси от заданных значений, вызванную отстаиванием. Также переход от аппаратов периодического действия к аппаратам непрерывного действия позволяет сократить габариты и металлоёмкость оборудования при крупнотоннажном производстве, что в свою очередь облегчает транспортировку, снижает затраты на монтаж и ремонт. Одним из наиболее прогрессивных методов повышения эффективности эмульгирования является проведение процесса в условиях воздействия механических колебаний ультразвукового диапазона частот.

**Цель:** установить влияние параметров неоднородной системы на интенсивность эмульгирования при комплексном воздействии механического перемешивания и ультразвуковых колебаний.

**Методы:** аналитический обзор результатов исследований ультразвукового эмульгирования неоднородных систем, аналитическое исследование распространения колебаний ультразвукового диапазона через слой двухфазной эмульсии, экспериментальное исследование процесса эмульгирования несмешивающихся жидкостей при механическом перемешивании в поле действия ультразвуковых колебаний.

**Результаты.** Рассмотрен процесс эмульгирования в условиях механического перемешивания и воздействия волн ультразвукового диапазона. Аналитическим путем определена зависимость интенсивности эмульгирования от физико-химических свойств жидкостей, состава смеси и высоты слоя эмульсии. Выявлено, что появление зон с резонансными механическими колебаниями для наибольшей эффективности диспергирования наблюдается при условии, что расстояние между источником ультразвука и свободной поверхностью жидкости равно целому числу длин полуволн механических колебаний в эмульсии. Полученные зависимости проверены экспериментальным путем при эмульгировании смеси «дизельное топливо – вода». Оценка качества эмульсии проводилась визуально по наличию сплошных однородных зон в объеме рассматриваемой системы, а также по размеру частиц дисперсной фазы, на фотографиях, полученных с помощью микроскопа.

### **Ключевые слова:**

Эмульсия, ультразвук, механические колебания, диспергирование, граница раздела фаз, механическое перемешивание.

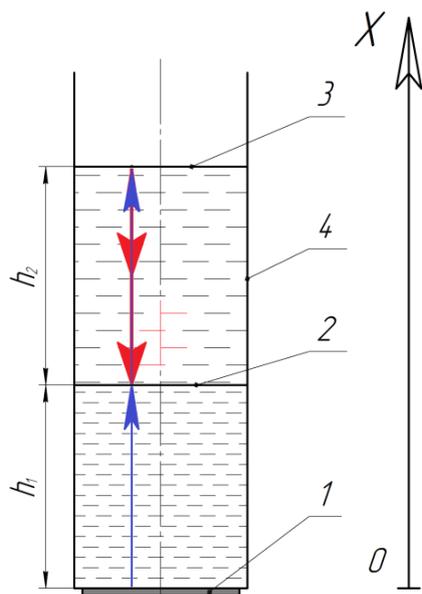
### **Ультразвуковое эмульгирование двухкомпонентных систем**

Процессы эмульгирования и деэмульгирования – одни из важнейших процессов на предприятиях нефтяной и нефтехимической промышленности, они проводятся на самых различных стадиях переработки нефтепродуктов: от обработки сырой нефти до получения готовой товарной продукции. Изучение механизма образования эмульсий в условиях различных воздействий является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность аппаратов для проведения указанных процессов и снизить их габаритные размеры [1–4].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности процесса получения мелкодисперсных эмульсий является использование механических колебаний ультразвукового диапазона. При таком воздействии сплошность жидкой фазы нарушается, проявляется акустическая кавитация, которая еще больше повышает эффективность дробления дисперсной фазы и, соответственно, интенсивность эмульгирования [5–9].

В трудах [10–16] рассмотрен процесс эмульгирования на горизонтальной границе, образованной двумя несмешиваемыми жидкостями разной плотности.

Продольные ультразвуковые колебания вводятся в систему с помощью пластины, закрепленной в нижней части сосуда (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема рассматриваемой модели: 1 – источник ультразвуковых колебаний; 2 – граница раздела фаз; 3 – свободная поверхность жидкости; 4 – корпус сосуда

**Fig. 1.** Scheme of the considered model: 1 – source of ultrasonic vibrations; 2 – interface; 3 – free surface; 4 – vessel body

В подобных системах жидкая фаза будет находиться под воздействием двух волн:

- прямой, создаваемой источником УЗК;
- обратной, отраженной от свободной поверхности эмульсии.

Суммарная амплитуда двух волн, накладываемых на границе раздела фаз, определяется:

$$A_{n1} = 2y_0 \cdot \cos 2\pi \frac{h_2}{\lambda_2} \cdot \cos 2\pi \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} \right),$$

где  $y_0$  – максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний, м;  $h_1, h_2$  – высота слоя первой и второй жидкости, м;  $\lambda_1, \lambda_2$  – длина волны ультразвуковых колебаний в первой и второй жидкости, м.

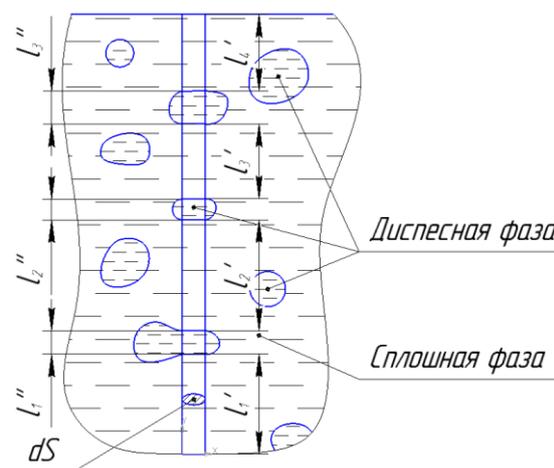
Использование данной формулы позволяет оценить интенсивность дискретного воздействия на статичную горизонтальную границу раздела фаз системы из двух несмешивающихся жидкостей с известными исходными параметрами.

Практическое применение полученных зависимостей в аппаратах непрерывного действия не представляется возможным, поскольку при движении сред из-за турбулентных явлений граница раздела фаз является неустойчивой по форме, положению и размерам, и даже небольшое возмущение движущихся потоков способно вызвать появление дисперсных частиц одной фазы в другой. Таким образом, граница раздела фаз будет непрерывно меняться и отклоняться от расчетного оптимального положения.

Исходя из вышесказанного, больший практический интерес представляет прогнозирование появления зон интенсивных механических колебаний в объеме, заполненном эмульсией с заданным составом, чем определение зависимости интенсивности эмульгирования при прохождении ультразвуковой волны через слои несмешивающихся жидкостей. Это связано с тем, что при грубом перемешивании дисперсная фаза, ограниченная межфазной поверхностью, при непрерывном изменении положения рано или поздно попадает в зону интенсивного воздействия и под действием ультразвука дробится на более мелкие частицы. То есть залогом эффективного эмульгирования является наличие большого количества зон интенсивных резонансных колебаний, поэтому основной задачей исследования является определение исходных параметров системы, при которых образуется максимальное число зон резонансных колебаний.

#### Аналитическое исследование распространения ультразвуковых колебаний в эмульсии

Для аналитического исследования распространения ультразвуковой волны в объеме, заполненном эмульсией, выделим элемент площадью  $dS$ , ориентированный в направлении распространения колебаний и ограниченный с одного торца поверхностью, излучающей ультразвук, а с другого – свободной поверхностью жидкости. Данный объем заполнен эмульсией, но так как поперечное сечение рассматриваемого элемента бесконечно мало, можно считать, что границы раздела фаз представляют собой плоскости, перпендикулярные направлению движения ультразвуковой волны (рис. 2).



**Рис. 2.** Элемент объема рассматриваемой системы двух несмешивающихся жидкостей

**Fig. 2.** Element of volume of the considered system of two immiscible liquids

При равномерном распределении дисперсной фазы в сплошной отношении суммарной длины элементов, заполненных одной жидкостью ( $\sum_{i=1}^n l'_i, \text{ м}$ ), к суммарной длине элементов, заполненных другой жидкостью ( $\sum_{j=1}^k l''_j, \text{ м}$ ), будет численно равно объемной концентрации эмульсии.

Продольные механические колебания ультразвукового диапазона в рассматриваемом элементе будут беспрепятственно проходить из одной среды в другую, меняя при этом скорость распространения и длину волны. Средняя скорость движения колебаний для двухфазной эмульсии определяется по формуле:

$$C_{эм} = C_{спл} (1 - y) + C_{дис} y, \quad (1)$$

где  $C_{спл}$  – скорость ультразвуковых волн в сплошной среде, м/с;  $C_{дис}$  – скорость ультразвуковых волн в дисперсной фазе, м/с;  $y$  – объемная концентрация дисперсной фазы в смеси.

Рассмотрим наложение двух встречных волн в однородной среде. Амплитуда колебания прямой волны в произвольной точке с координатой  $x$ :

$$A = y_0 \cos 2\pi \frac{x}{\lambda_{эм}},$$

где  $y_0$  – максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний, м;  $x$  – координата рассматриваемой точки, м;  $\lambda_{эм}$  – длина волны ультразвуковых колебаний в эмульсии, м.

Обратная волна в той же точке имеет амплитуду:

$$A = y_0 \cos 2\pi \frac{2h - x}{\lambda_{эм}},$$

где  $h$  – высота слоя эмульсии, м.

Амплитуда механических ультразвуковых колебаний суммарной волны при интерференции:

$$A_{сум}(x) = 2y_0 \cdot \cos 2\pi \frac{h}{\lambda_{эм}} \cdot \cos 2\pi \frac{h - x}{\lambda_{эм}}.$$

Анализируя полученное выражение, необходимо отметить, что появление зон с наиболее интенсивными механическими колебаниями наблюдается, когда расстояние до свободной поверхности ( $h$ ) равно целому числу полуволен ультразвуковых колебаний:

$$h = \frac{n \cdot \lambda_{эм}}{2},$$

где  $n$  – натуральное число;  $\lambda_{эм}$  – длина волны ультразвуковых колебаний в эмульсии, м.

Или с учетом выражения (1):

$$h = \frac{n(C_{спл}(1 - y) + C_{дис}y)}{2\nu}.$$

#### Экспериментальные исследования процесса эмульгирования при механическом перемешивании и воздействии ультразвука

Проверка указанных формул была проведена на примере эмульсии «вода – дизельное топливо», находящейся под воздействием ультразвуковых колебаний с частотой 30 кГц, кроме того, во время эксперимента производилось непрерывное механическое перемешивание. Такая комбинация факторов наиболее приближена к реальным условиям, в которых роль механической мешалки может выполнять турбулентный режим течения исходных жидкостей, обеспечивающий их грубое смешение, а мелкодисперсное

эмульгирование осуществляется при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний [17–20].

В связи с ограниченными размерами испытательного сосуда, а также для предотвращения расслоения при предварительном перемешивании максимальная высота столба эмульсии принята 75 мм. Начальная концентрация воды 15 %, дизельной фракции 85 %, т. е. максимальная концентрация воды в эмульсии, при которой она может использоваться в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания.

Перед каждым экспериментом в емкость заливали заданное количество исходных компонентов. В связи с тем, что площадь поперечного сечения сосуда для приготовления эмульсии постоянная по высоте, объёмная концентрация смеси задавалась отношением высот каждого слоя (15 и 85 % от общей высоты слоя эмульсии). Для создания грубой эмульсии использовалась механическая мешалка с частотой вращения до 500 об/мин, что позволило, с одной стороны, предотвратить расслоение неоднородной системы в начальный период времени, а с другой – не вызвать образование мелкодисперсной эмульсии (с частицами до 10 мкм) за счет турбулентных явлений и точнее оценить интенсивность воздействия ультразвука.

Наибольшее воздействие ультразвуковых колебаний на эмульсию наблюдается при расчетной высоте смеси 23, 46 и 69 мм, а минимальное – при толщине слоя 35 и 59 мм. На рис. 3 показаны результаты расслоения обработанной смеси с толщинами слоя 46 и 59 мм через 3 минуты.

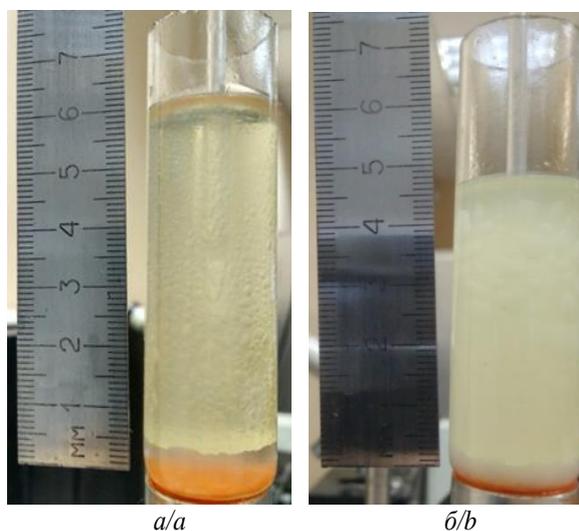


Рис. 3. Эмульсия «дизельное топливо – вода» после ультразвукового воздействия: а)  $h=59$  мм; б)  $h=46$  мм

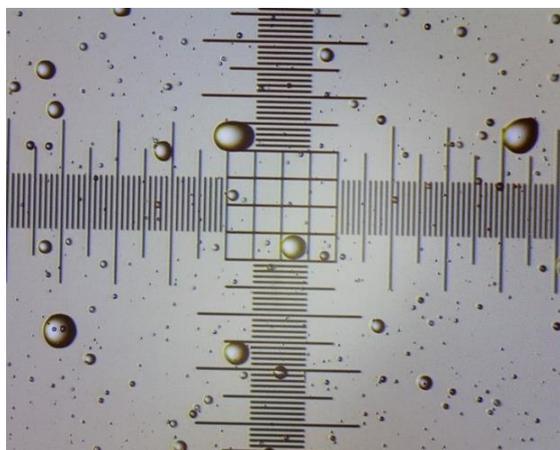
Fig. 3. Emulsion «diesel fuel – water» after ultrasonic treatment: a)  $h=59$  mm; б)  $h=46$  mm

При высоте слоя эмульсии 59 мм, то есть при расчетном минимальном воздействии ультразвука, отсутствовали акустические каверны при проведении процесса, а по окончании перемешивания сохранялась прозрачность смеси, что свидетельствует о малом количестве мелкодисперсной фазы в сплошной. Исследование эмульсии под микроскопом подтвердило данное

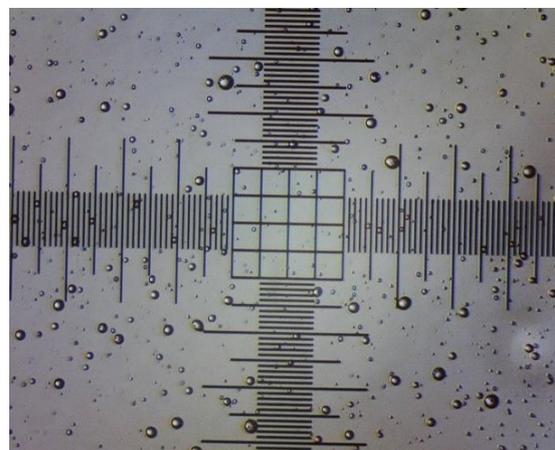
предположение (рис. 4, а) – в смеси присутствуют крупные образования, равномерность низкая.

Расчетная оптимальная высота смеси (46 мм) позволила существенно повысить степень воздействия ультразвука на обрабатываемую систему. В процессе смешения наблюдался характерный потрескивающий звук и образование зон интенсивного эмульгирования.

После окончания воздействия в дизельном топливе появлялись мелкодисперсные частицы воды, существенно уменьшающие прозрачность смеси. На рис. 4, б представлена смесь под микроскопом. Дисперсия распределения размеров капель ниже, что свидетельствует о более эффективном процессе эмульгирования.



а/а



б/б

**Рис. 4.** Размеры частиц воды в дизельном топливе. Расчетное воздействие ультразвука: а) минимальное; б) максимальное (цена минимального деления 10 мкм)

**Fig. 4.** Dimensions of water particles in diesel fuel. Estimated impact of ultrasound: a) minimum; b) maximum (value of the minimum division is 10 microns)

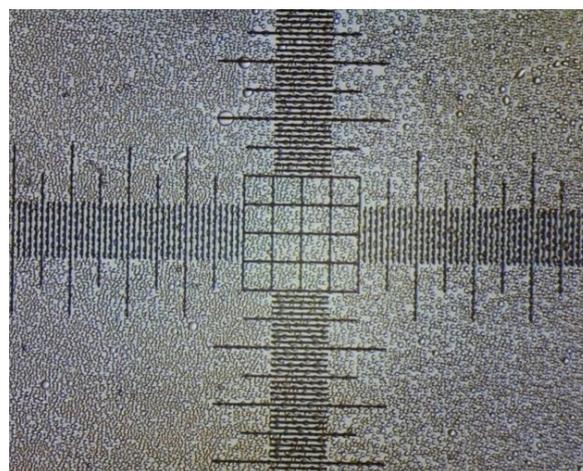
**Таблица.** Количественная оценка качества эмульсии

**Table.** Quantitative assessment of emulsion quality

Диаметр частиц дисперсной фазы, мкм Particle diameter of the dispersed phase, $\mu\text{m}$	Эмульсия при минимальном расчетном воздействии ультразвука Emulsion with a minimum influence by ultrasound		Эмульсия при максимальном расчетном воздействии ультразвука Emulsion with a maximum influence by ultrasound	
	Количество, шт Quantity, pcs	Объемная концентрация, % Volume concentration, %	Количество, шт Quantity, pcs	Объемная концентрация, % Volume concentration, %
0–5	268	4,23	450	10,15
5–10	96	12,61	175	32,88
10–15	64	34,43	40	30,78
15–20	6	10,01	7	16,71
20–50	9	38,73	2	9,48
Итого/Total	443	100	674	100

Анализ распределения частиц по размерам представлен в таблице. Необходимо отметить, что при аналогичных исходных параметрах смеси оптимальные параметры системы позволяют увеличить количество образующихся частиц дисперсной фазы в 1,5 раза. При максимальном расчетном воздействии ультразвука более 60 % объема дисперсной фазы дробятся на частицы диаметром 5–15 мкм, при этом отсутствуют глобулы диаметром более 25 мкм. При обработке смеси ультразвуком в условиях минимального расчетного воздействия менее половины объема вводимого компонента смеси достигает целевого размера частиц, при этом в полученной эмульсии присутствуют частицы дисперсной фазы более 25 мкм.

При максимальном воздействии ультразвука на смесь образуется квазистабильная эмульсия в нижней части сосуда, сплошной фазой которой является вода. Прозрачность смеси низкая, возможность оптического исследования была только для тонких слоев полученной смеси. На рис. 5 представлена фотография с микроскопа пробы, отобранной из нижней части сосуда.



**Рис. 5.** Размеры частиц дизельного топлива в воде (цена минимального деления 10 мкм)

**Fig. 5.** Dimensions of diesel fuel particles in water (value of the minimum division of 10 microns)

Стабильность смеси в состоянии покоя сохранялась на протяжении 12 дней, после этого в нижней части визуально отмечалось появление прозрачного слоя. Это свидетельствует об эффективном эмульгировании при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний и механического перемешивания в условии оптимального состояния исходной системы.

#### Заключение

Таким образом, аналитическая зависимость вероятности появления зон с интенсивными колебаниями от физико-химических свойств и состояния двухкомпонентной смеси позволит оптимизировать устройства для эмульгирования неоднородных систем при комплексном воздействии механического и ультразвукового воздействия. Практическое применение

полученных зависимостей реализуется в процессе разработки и оптимизации устройств для эмульгирования проточного типа, в которых грубое механическое перемешивание происходит за счет турбулентных явлений при движении исходной смеси, а ультразвуковые колебания перпендикулярно скорости движению потока вводятся с помощью пьезоэлектрических преобразователей.

*Исследования проведены в Уфимском государственном нефтяном техническом университете в рамках реализации инициативного научного проекта фундаментального характера по государственному заданию образовательным учреждениям высшего образования на 2017–2019 гг. (№ 9.7294.2017/8.9 от 31.01.2017) при содействии Межвузовского центра коллективного пользования «Региональный научно-производственный комплекс "Недра"».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effect of emulsification and blending on the oxygenation and substitution of diesel fuel for compression ignition engine / Ftwi Y. Hagos, Obed M. Ali, Rizalman Mamat, Abdul A. Abdullah // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – August 2017. – V. 75. – P. 1281–1294.
2. Иванов В.П., Дронченко В.А. Разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании // *Вестник Брестского государственного технического университета*. – 2014. – № 4 (88). – С. 38–42.
3. Эмульгирование водонефтяных смесей в рабочих органах винтовых насосов / А.М. Бадретдинов, Ф.А. Мамонов, А.М. Валеев, Р.Я. Загиров, Р.З. Ахметгалеев // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2005. – № 64. – С. 231–234.
4. Оценка эффективности работы проточных смесителей для перемешивания гомо- и гетерогенных систем / Ф.Ш. Хафизов, В.Г. Афанасенко, И.Ф. Хафизов, А.Ш. Хайбрахманов // *Химическая промышленность*. – 2008. – Т. 85. – № 3. – С. 152–155.
5. Silver B.R., Holub K., Mareček V. Spontaneous emulsification at surfactantless liquid/liquid interfaces // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 2017. – V. 805. – № 15. – P. 91–97.
6. Кудряшов Б.А., Ливанский А.Н., Нигметзянов Р.И. Перспективы использования ультразвукового эмульгирования в промышленности // *Научнокемические технологии в машиностроении*. – 2011. – № 6. – С. 25–28.
7. Hamida T., Babadagli T. Investigations on capillary and viscous displacement under ultrasonic waves // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. – 2006. – V. 45. – № 2. – С. 16–19.
8. Homogenisation devices for the production of miniemulsions / K. Ouzineb, C. Lord, N. Lesauze, C. Graillat, P.A. Tanguy, T. McKenna // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – V. 61. – № 9. – P. 2994–3000.
9. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Математическая модель эволюции аэрозолей при ультразвуковом воздействии // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 160–163.
10. Изменение фракционного состава углеводородного топлива в поле акустической кавитации / М.Г. Руденко, Т.А. Лавренко, М.И. Васильцов, С.С. Горбасенко // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. – 2016. – № 1. – С. 23–24.
11. Интенсификация процесса эмульгирования в условиях одновременного воздействия прямых и отраженных ультразвуковых колебаний / В.Г. Афанасенко, И.Р. Кузеев, Ю.С. Ковшова, П.А. Кулаков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 44–51.
12. Ультразвуковое эмульгирование нефти и нефтепродуктов / А.Н. Ливанский, Б.А. Кудряшов, В.Д. Титков, А.Ю. Дунин // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2011. – № 11. – С. 28–32.
13. Формирование зон с максимальной интенсивностью ультразвуковой кавитации в однокомпонентных и многокомпонентных средах / Б.И. Бахтин, А.И. Ивашов, А.В. Кузнецов, А.С. Скороходов // *Инженерно-физический журнал*. – 2016. – Т. 89. – № 3. – С. 662–669.
14. Behrend O., Schubert H. Influence of hydrostatic pressure and gas content on continuous ultrasound emulsification // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2001. – V. 8. – № 3. – P. 271–276.
15. Cuheval A., Chow R.C.Y. A study on the emulsification of oil by power ultrasound // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2008. – V. 15. – № 5. – P. 916–920.
16. Banks C.E., Klymenko O.V., Compton R.G. Liquid-liquid processes and kinetics in acoustically emulsified media // *PCCP: Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2003. – V. 5. – № 8. – P. 1652–1656.
17. Кулаков П.А., Афанасенко В.Г. Влияние минимально допустимого количества сырья на вероятность отказа системы насос-емкость // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2018. – № 9. – С. 37–40.
18. Emulsification in novel ultrasonic cavitation intensifying bag reactors / R. van Zwieten, B. Verhaagen, K. Schroën, D.F. Rivas // *Ultrasonics Sonochemistry*. – May 2017. – V. 36. – P. 446–453.
19. Поверхность и поверхностные явления / И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Ю.Н. Савичева, С.В. Попова. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2009. – 144 с.
20. Поверхность кавитирующего пузырька / В.Б. Акопян, С.В. Альков, М.В. Бамбура, Ю.А. Ершов // *Машиностроитель*. – 2015. – № 12. – С. 10–15.

*Поступила 12.03.2020 г.*

#### Информация об авторах

**Афанасенко В.Г.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Кулаков П.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Боев Е.В.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой общей химической технологии Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Имаева Э.Ш.**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Давлетов О.Б.**, старший преподаватель кафедры механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Мазидуллин Д.Н.**, ассистент кафедры механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 66.063.61

## OPTIMIZATION OF ULTRASOUND EMULSION UNDER MECHANICAL MIXING

**Vitaly G. Afanasenko<sup>1</sup>,**  
afanasenko.v.g@yandex.ru

**Petr A. Kulakov<sup>1</sup>,**  
kulakov.p.a@mail.ru

**Evgeniy V. Boev<sup>1</sup>,**  
boev\_ugntu@fromru.com

**Emma Sh. Imaeva<sup>1</sup>,**  
imaeva2014@yandex.ru

**Oleg B. Davletov<sup>1</sup>,**  
davolegus@mail.ru

**Denis N. Mazidullin<sup>1</sup>,**  
mazidullinden@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**Relevance of the research.** The process of emulsification is widespread in industry both in the primary processing of hydrocarbons and in the final stages of production of marketable products. The organization of continuous production of stable emulsions in flow-type devices before their direct application is of particular interest. This approach significantly reduces the deviation of the mixture concentration from the given values, caused by settling. The transition from batch devices to continuous machines allows reducing as well the size and intensity of the equipment, with large-scale production, which in its turn facilitates transportation, reduces installation and repair costs. One of the most progressive methods of increasing the efficiency of emulsification is to conduct the process under the influence of mechanical vibrations of the ultrasonic frequency range.

**The main aim** of the research is to establish the influence of the inhomogeneous system parameters on the emulsification intensity under the complex effect of mechanical mixing and ultrasonic vibrations.

**Methods:** analytical review of the results of ultrasound emulsification of inhomogeneous systems, analytical study of the propagation of vibrations of the ultrasonic range through a layer of a two-component emulsion, experimental study of emulsification of immiscible liquids under mechanical stirring in the field of action of ultrasonic vibrations.

**Results.** The paper considers emulsification under conditions of mechanical mixing and exposure to ultrasonic waves. The authors have determined analytically the dependence of the emulsification intensity on the physicochemical properties of liquids, the composition of the mixture and the height of the emulsion layer. It is revealed that the appearance of zones with resonant mechanical vibrations for the greatest dispersion efficiency is observed provided that the distance between the ultrasound source and the free surface of the liquid is an integer number of half-wavelengths of mechanical vibrations in the emulsion. The dependences obtained were verified experimentally by emulsifying the «diesel fuel – water» mixture. Evaluation of the quality of the emulsion was carried out visually by the presence of continuous homogeneous zones in the volume of the system under consideration, as well as by the size of the particles of the dispersed phase, in photographs taken with a microscope.

**Key words:**

Emulsion, ultrasonics, mechanical vibrations, dispersion, interphase boundary, mechanical mixing.

The research was carried out at Ufa State Petroleum Technological University within the implementation of initiative scientific project of fundamental nature by the State task for higher education institutions for 2017–2019 (no. 9.7294.2017/8.9, 31.01.2017) with assistance of the Interuniversity core facilities centre «Regional research and production complex "Nedra"».

**REFERENCES**

1. Ftwi Y. Hagos, Obed M. Ali, Rizalman Mamat, Abdul A. Abdul-lah Effect of emulsification and blending on the oxygenation and substitution of diesel fuel for compression ignition engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, August 2017, vol. 75, pp. 1281–1294.
2. Ivanov V. P., Donchenko V.A. The destruction of the interface of two immiscible liquids in emulsified. *Vestnik of Brest state technical University*, 2014, no. 4 (88), pp. 38–42. In Rus.
3. Badretdinov A.M. Mamonov F.A., Valeev A.M., Zagirov R.Ya., Ahmetgaliev R.Z. Emulsification of oil-water mixtures in the working bodies of screw pumps. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and petroleum products*, 2005, no. 64, pp. 231–234. In Rus.
4. Khafizov F.Sh., Afanasenko V.G., Khafizov I.F., Khaibrakhmanov A.Sh. Main treatment ways of manufacturing water on the local plants. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2008, vol. 81, no. 9, pp. 1697–1698.
5. Silver B.R., Holub K., Mareček V. Spontaneous emulsification at surfactantless liquid/liquid interfaces. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, vol. 805, no. 15, pp. 91–97.
6. Kudryashov B.A., Lebanese A.N., Nigmatzyanov R.I. Prospects for the use of ultrasonic emulsification in industry. *High technologies in mechanical engineering*, 2011, no. 6, pp. 25–28. In Rus.
7. Hamida T., Babadagli T. Investigations on capillary and viscous displacement under ultrasonic waves. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2006, vol. 45, no. 2, pp. 16–19.

8. Ouzineb K., Lord C., Lesauze N., Graillat C., Tanguy P.A., McKenna T. Homogenisation devices for the production of miniemulsions. *Chemical Engineering Science*, 2006, vol. 61, no. 9, pp. 2994–3000.
9. Kudryashova O.B., Antonicheva A.A. Mathematical model of the evolution of aerosols at ultrasonic influence. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 2, pp. 160–163.
10. Rudenko M.G., Lavrenyuk T.A., Vasiltsov M.I., Gorbatenko S.S. Changing of the fractional composition of hydrocarbon fuels in the field of acoustic cavitation. *Modern technologies and scientific-technical progress*, 2016, no. 1, pp. 23–24. In Rus.
11. Afanasenko V.G., Kuzeev I.R., Koushova Yu.S., Kulakov P.A. Emulsification intensification under simultaneous impact of original and reflected ultrasonic vibrations. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 44–51.
12. Lebanese A.N., Kudryashov B.A., Titkov V.D., Dunin A.Y. Ultrasonic emulsification of oil and oil products. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2011, no. 11, pp. 28–32. In Rus.
13. Bakhtin B.I., Ivashov A.I., Kuznetsov A.V., Skorokhodov A.S. Formation of zones of maximum intensity of ultrasonic cavitation in single-component and multicomponent environments. *Engineering-physical journal*, 2016, vol. 89, no. 3, pp. 662–669. In Rus.
14. Behrend O., Schubert H. Influence of hydrostatic pressure and gas content on continuous ultrasound emulsification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 271–276.
15. Cucheval A., Chow R.C.Y. A study on the emulsification of oil by power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, vol. 15, no. 5, pp. 916–920.
16. Banks C.E., Klymenko O.V., Compton R.G. Liquid-Liquid processes and kinetics in acoustically emulsified media. *PCCP: Physical Chemistry Chemical Physics*, 2003, vol. 5, no. 8, pp. 1652–1656.
17. Kulakov P.A., Afanasenko V.G. Influence of minimally permissible quantity of source materials on the probability of failure of a pump-tank system. *Chemical and petroleum engineering*, 2019, vol. 54, no. 9–10, pp. 681–686.
18. van Zwieten R., Verhaagen B., Schroën K., Rivas D.F. Emulsification in novel ultrasonic cavitation intensifying bag reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, May 2017, vol. 36, pp. 446–453.
19. Kuzeyev I.R., Naumkin E.A., Savicheva Yu.N., Popov S.V. *Poverkhnost i poverkhnostnye yavleniya* [Surface and surface phenomena]. Ufa, Neftegazovoe delo Publ., 2009. 144 p.
20. Akopyan V.B., Alkov S.V., Bambur M.V., Ershov Yu.A. The surface of cavitation bubble. *Mashinostroitel*, 2015, no. 12, pp. 10–15. In Rus.

Received: 12 March 2020.

#### Information about the authors

**Vitaly G. Afanasenko**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Petr A. Kulakov**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Evgeniy V. Boev**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Emma Sh. Imaeva**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

**Oleg B. Davletov**, senior lecturer, Ufa State Petroleum Technological University.

**Denis N. Mazidullin**, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 553.411

## ТИПЫ, РАЗМЕЩЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПАЛЕОГЕНОВЫХ И НЕОГЕНОВЫХ РОССЫПЕЙ ЗОЛОТА В ЗАПАДНО-КАЛБИНСКОМ ЗОЛОТОНОСНОМ РАЙОНЕ (ВОСТОЧНЫЙ КАЗАХСТАН)

Третьяков Александр Валентинович<sup>1</sup>,  
alextret\_1210@mail.ru

Нигматова Саида Араповна<sup>1</sup>,  
nigmatova@mail.ru

Габитова Умиль Булатовна<sup>1</sup>,  
umil@bk.ru

<sup>1</sup> Университет Сатпаев, Казахстан,  
050010, Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью расширения сырьевой базы золотодобывающих предприятий Казахстана и научного обоснования перспектив вовлечения в эксплуатацию палеогеновых и неогеновых россыпных месторождений золота, условия формирования и закономерности размещения которых до настоящего времени не получили всесторонней оценки, хотя их продуктивность многократно превосходит потенциал россыпей четвертичного возраста.

**Цель:** укрепление сырьевой базы россыпного золота Республики Казахстан и повышение эффективности ее освоения за счет изучения палеогеографических, палеоклиматических и неотектонических условий локализации россыпей кайнозойского возраста и уточнения критериев их поиска на площади Западно-Калбинского золотоносного района в Восточном Казахстане.

**Объекты:** палеоген-неогеновые россыпи золота, древние россыпелокализирующие элементы рельефа и вмещающие отложения.

**Методы:** сбор и анализ имеющихся данных по россыпям золота палеогенового и неогенового возраста, распределению их формационной принадлежности золоторудных объектов; уточнение параметров древних долин и внутригорных впадин путем дешифрирования космических снимков; проведение геолого-геоморфологических наблюдений; составление карты россыпной золотоносности на геоморфологической основе и реконструкция геоморфологической зональности; картирование палеогеновых и неогеновых отложений, изучение их золотоносности, детальное комплексное изучение наиболее полных разрезов с отбором проб.

**Результаты.** Установлено, что россыпи палеогенового и неогенового возраста локализируются в древних долинах и впадинах, период их формирования охватывал длительный промежуток времени – от олигоцена до плиоцена. По генезису среди них выделены аллювиальные, аллювиально-пролювиальные и пролювиальные, в том числе локализованные во впадинах большеобъемные аллювиально-пролювиальные россыпи с преобладанием мелкого и тонкого золота. Основной закономерностью размещения палеоген-неогеновых россыпей является их пространственно-парагенетическая связь с коренными источниками, локальная геоморфологическая зональность определяет геолого-геоморфологические типы россыпей.

### Ключевые слова:

Палеогеновые и неогеновые россыпи золота, древние долины, древние впадины, погребенные россыпи, Западно-Калбинский золотоносный район.

### Введение

В настоящее время в Казахстане проводится интенсификация золотодобывающей отрасли. Эта задача определяет необходимость изучения и освоения разнотипных золотых месторождений, в том числе россыпных. Особого внимания заслуживают древние – палеогеновые и неогеновые – россыпи золота на территории Западно-Калбинской золотоносной зоны, входящей в состав Восточно-Казахстанского золотоносного пояса (рис. 1).

Западно-Калбинская золотоносная зона, пространственно совпадающая с центральной частью Западно-Калба-Коксентауской (ЗКК) зоны, имеет северо-западное простирание при протяженности более 300 км, ее ширина от 80 до 150 км. Северо-восточной границей является Теректинский, юго-восточной – Нарымский, юго-западной – Чарско-Горностаевский глубинные разломы [2]. Структурное основание ЗКК разбито на тектонические блоки, мощность терригенного слоя в которых различна и изменяется от 5,5 до 9,8 км [3].

### Методика исследований

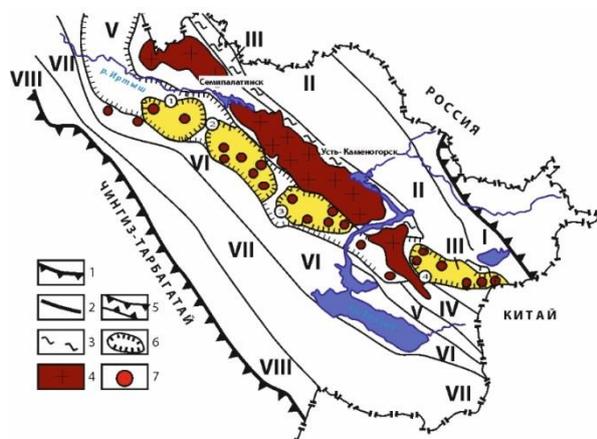
Основными методами исследования являются сбор и анализ имеющихся данных по россыпям золота палеогенового и неогенового возраста, распределению и формационной принадлежности золоторудных объектов; уточнение параметров древних долин и внутригорных впадин путем дешифрирования космических снимков; проведение геолого-геоморфологических наблюдений, составление карты россыпной золотоносности на геоморфологической основе, реконструкция геоморфологической зональности, картирование палеогеновых и неогеновых отложений, изучение их золотоносности, детальное комплексное изучение наиболее полных разрезов с отбором проб.

### Основные черты геологического строения

По данным предшествующих исследователей [2], ЗКК имеет следующее геологическое строение.

В нижней части разреза отложений палеозоя залегают *алевролитовая аспидная* формация раннего–среднего фанера мощностью 300 м. Ее перекрывает

базальтовая известняково-терригенно-кремнистая формация фамена – позднего турне мощностью 1500 м. Вышележащие ранневизейские образования представлены известняково-песчаниково-алевролитовой формацией мощностью 300 м. После внутривизейского перерыва образовалась флишидная углеродисто-известковисто-терригенная формация среднего-верхнего визе мощностью 500 м. Последние с разрывом перекрываются граувакковой алевролитопесчаниковой с олистостромами формацией серпуховского яруса нижнего карбона мощностью до 1400 м. Описанные выше образования ранней стадии герцинид со структурным несогласием перекрыты осадками средней стадии герцинского цикла, представленными лимническими, часто угленосными молассами буюновской и бакырчикской свит среднего-верхнего карбона мощностью 1000 м.



**Рис. 1.** Позиция Восточно-Казахстанского золотоносного пояса в структурах Большого Алтая (по [1]): 1 – границы Большого Алтая; 2 – границы металлогенических зон; 3 – Иртышская зона смятия; 4 – Калба-Нарымский гранитоидный пояс; 5 – Восточно-Казахстанский золоторудный пояс; 6 – рудные районы (1 – Мукурский, 2 – Бакырчикский, 3 – Кулуджунский, 4 – Южноалтайский); 7 – золоторудные месторождения. Структурные зоны: I – Белоубинско-Сарымсактинско-Куртинская; II – Рудноалтайско-Ашалинская; III – Иртыш-Фуюньская; IV – Калба-Нарым-Бурчумская; IV – Западно-Калба-Коксентауская; VI – Жарма-Саур-Харатунгская; VII – Сериктас-Сарсазан-Кобукская; VIII – Чингиз-Тарбагатайская

**Fig. 1.** Layout of the East Kazakhstan gold belt in the structure of the Big Altai (Bol'shoy Altai) (according to [1]). Legend: 1 – the boundaries of Big Altai; 2 – boundaries of metallogenic zones; 3 – Irtysh collapse zone; 4 – Kalba-Narym granitoid belt; 5 – East Kazakhstan gold belt; 6 – ore areas (1 – Mukursky, 2 – Bakyrchik, 3 – Kuludzhunsky, 4 – South Altai); 7 – gold deposits. Structural zones: I – Beloubinsko-Sarymsakta-Kurtin; II – Rudno-Altai-Ashalinsk; III – Irtysh-Fuyunskaya; IV – Kalba-Narym-Burchumskaya; IV – West Kalba-Kokstau; VI – Zharma-Saur-Kharatung; VII – Seriktas-Sarsazan-Kobukskaya; VIII – Chingiz-Tarbagatai

По содержанию углеродистого вещества породы сопоставляются с умеренно углеродистой формацией с неравномерным распределением золота. По представлениям Х.А. Беспаява, Ю.С. Парилова [4], в неизмененных разностях терригенных отложений нижнекарбонной аркалыкской свиты, среднекарбонных буюновской свиты и серпуховского яруса среднее содержание золота составляет в среднем 3,1 мг/т.

Интрузивные образования разнообразны по составу и возрасту. Наиболее древними являются протрузии серпентинитов, приуроченные к зоне Чарско-Горностаевского разлома. В девонское время произошло внедрение базитовых субвулканических тел и даек габбро-плагиогранитной формации. Средневерхнекарбонное время ознаменовано проявлениями разнообразной гаммы интрузивных образований, с которыми связано формирование золоторудных месторождений.

Габбронорит-диабазовая формация (карабирюкский комплекс  $C_{2-3}$ ) сформирована в две фазы. Первая объединяет крупнозернистые оливиновые габбронориты, мелкозернистые габбронориты и габбро-диабазы, вторая сложена крупно- и среднезернистыми габбродиоритами и диоритами. Измененные разности габброидов и диоритов (брекчирование, окварцевание и пиритизация) сопровождаются золото-сульфидным оруденением [2, 4].

Плагиогранит-гранодиоритовая формация (кунушский комплекс,  $C_3$ ) широко развита. Комплекс представлен небольшими массивами штокообразной и дайкообразной формы размером 0,1–3 км<sup>2</sup>; массивы группируются в цепочки, а дайки образуют протяженные пояса. Комплекс представлен роговообманково-биотитовыми гранодиоритами и биотитовыми плагиогранитами [2, 4]. Породы комплекса геохимически специализированы на золото, по данным [4] его среднее содержание составляет 4,9 мг/т. С кунушским комплексом связано золото-кварцевое и золото-сульфидно-кварцевое оруденение.

Пермское время ознаменовано формированием Калба-Нарымского пояса гранитоидных интрузий [2].

Пликвативная структура ЗКК выражена северо-западными крутыми линейными складками протяженностью до 15–50 км при ширине 3–10 км. Мелкая складчатость чаще изоклиная, с опрокидыванием складок к юго-западу. Широким развитием пользуются разрывные нарушения. Глубинные разломы северо-западного направления протягиваются через всю территорию района и прослеживаются далеко за его пределы. Разломы северо-восточного простирания, поперечные относительно общего структурного плана, как и ортогональные нарушения, устанавливаются геофизическими методами и при дешифрировании космоснимков.

#### Коренные источники россыпного золота

В районе развиты кварцево-жильный и золото-арсенопирит-пиритовый типы золоторудных месторождений, на западном фланге развиты месторождения окисленных руд в корах выветривания [4].

*Кварцево-жильный золоторудный тип* месторождений по условиям залегания рудных тел подразделяются на два подтипа.

*Кварцево-жильный подтип* представлен разно-масштабными жильными золото-кварцевыми и золото-кварц-сульфидными объектами, локализованными в осадочных и вулканогенно-осадочных толщах. Жилы существенно кварцевые, примесь – карбонат, серицит и сульфиды (до 3–7 %). Рудные минералы: самородное золото, арсенопирит и пирит. В рудах преобладает свободное самородное золото (до 95 %), размер зерен от 0,05 до 0,5 мм, редкие золотины достигают размера до 30 мм. В сульфидах содержится тонкодисперсное золото (10–20 мкм).

*Кварцево-прожилковый подтип* представлен сериями кварцевых прожилков и штокверками в штоках и дайках диабазов, габбро-диабазов, плагиогранитов, гранодиоритов, плагиогранит-порфиров и кварцевых порфиров. Главные рудные минералы: пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, шеелит и золото. Золото в рудах (до 95 %) свободное, его гранулометрический состав аналогичен месторождениям кварцево-жильного подтипа. На месторождении Баладжал отмечены случаи, когда маломощные (3–5 см) кварцевые прожилки на три четверти были сложены золотом.

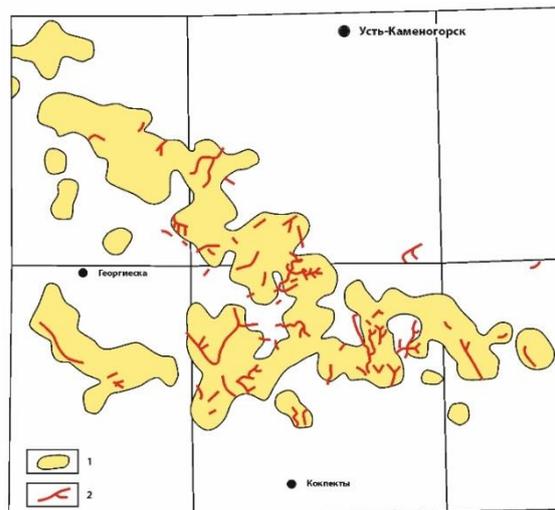
*Золото-арсенопирит-пиритовый тип* месторождений зон является ведущим по масштабам коренных объектов. Рудные тела представляют собой лентообразные залежи прожилково-вкрапленного золото-сульфидного оруденения, локализованные в метасоматически измененных породах. Протяженность рудных тел от 150 до 600 м, мощность – от 0,6 до 32,8 м. Основные минералы руд: пирит, арсенопирит и золото, второстепенные – антимонит, пирротин, марказит, халькопирит, галенит. Золото в рудах тонкодисперсное, ассоциированное в пирите и арсенопирите с размером вкраплений 0,1–29 мкм.

Россыпеобразующими коренными источниками являются объекты кварцево-жильного типа, содержащие до 95 % свободного самородного золота, большая часть которого представлена россыпеобразующими классами крупности. По данным А.Ф. Коробейникова и др. [3], кварцево-жильные месторождения составляют 42,6 %, прожилково-вкрапленные – 22,6 %, золото-сульфидные – 35,8 % от общего числа месторождений и рудопроявлений в районе. То есть к потенциальным россыпеобразователям относится 65,2 % от всех золоторудных объектов района.

Путем совместного анализа данных о глубинах формирования золоторудных месторождений и денудационного среза за пострудный период авторами определен относительный эрозионный срез золоторудных объектов за неотектонический период.

По оценкам А.Ф. Коробейникова и др. [3], глубина формирования золото-кварцевых руд от палеоперверхности составляла от 0,6 до 3,2–3,5 км при вертикальном размахе оруденения от 0,4 до 2 км. Возраст золото-кварцевых месторождений оценивается ими как позднекаменноугольный. По представлениям

Г.Н. Щербы и др. [2], денудационный срез различных участков Западной Калбы за постгерцинское время варьирует от 1–2 до 4,5–6 км. Совместная интерпретация этих данных показывает, что осредненная величина денудационного среза месторождений золото-кварцевой формации достигает 1,9–2,4 км. Это позволяет предполагать значительную эродированность россыпеобразующих золото-кварцевых объектов. Это подтверждается развитием околорудной пропилитизации на ряде золоторудных объектов, что по данным А.Ф. Коробейникова и др. [3] свидетельствует о нижнерудном эрозионном срезе этих рудных полей.



**Рис. 2.** Структура размещения золоторудных объектов юго-восточного фланга Западно-Калбинского района, положение россыпей золота различных геолого-генетических типов и возраста относительно нее (составил А.В. Третьяков): 1 – ареал развития коренных источников; 2 – разнотипные и разновозрастные россыпи золота

**Fig. 2.** Localization of gold placers of various geological-genetic types and ages relative to motherlode structures in West Kalba. Composed by A.V. Tretyakov: 1 – motherlode development areas; 2 – gold placers

#### Структура размещения коренных источников

Золоторудные месторождения и проявления юго-восточного фланга Западно-Калбинского золоторудного района сконцентрированы в поясе шириной от 12–15 до 70 км (рис. 2).

#### Геоморфологические особенности

Основными морфоструктурами района являются Калбинское нагорье и Чарско-Семипалатинская структурная перемычка.

Калбинское нагорье представляет собой единую сводовую структуру, осевая линия которой совпадает с орографической осью Калбинского хребта. По мнению В.С. Ерофеева [5], ее формирование обусловлено неотектоническим воздыманием поверхности выравнивания с амплитудой 600–1000 м. Юго-восточное крыло Калбинского нагорья осложнено Жолдыбайским и Баладжальским разломами с амплитудой сбросовых перемещений до 250–300 м, по которым

образован Жолдыбайский грабен, выполненный кайнозойскими отложениями. Северо-западная часть Калбинского поднятия осложнена Киинсу-Тройницким прогибом, в пределах которого развиты реликты древней коры выветривания и кайнозойские отложения мощностью до 80–100 м.

Чарско-Семипалатинская структурная перемычка располагается между поднятиями Калбы и Тарбагатай, на юго-западе района. Ее северо-западный фланг представляет собой мелкосопочный пенеплен с древней долинной сетью, выполненной красноцветными глинами плиоцена, под которыми залегают аллювиальные галечники. В центральной части структуры располагается Чарская впадина, где мощность отложений кайнозойского и четвертичного возраста достигает 130 м. Юго-восточнее Чарской впадины, в области водораздела рек Чар и Кокпекты, описываемая структура осложнена поперечным поднятием, в пределах которого развит низкорасчлененный эрозионно-тектонический рельеф.

По комплексу ведущих рельефообразующих процессов рельеф Калбинского нагорья подразделяется на три типа: денудационный, эндогенно-экзогенный (эрозионно-тектонический, денудационно-тектонический, мелкосопочный) и аккумулятивный.

Денудационный рельеф – региональная поверхность выравнивания (РПВ), в различной степени расчлененная экзогенными процессами. По данным предшествующих исследователей [5], формирование РПВ происходило в две стадии. Первая охватывала длительный промежуток времени – с верхов раннего мела до раннего эоцена, вторая, менее продолжительная, – с верхнего эоцена до раннего олигоцена. К настоящему времени РПВ сохранилась в виде пологонаклонных фрагментов в приводораздельных частях нагорья. На юго-восточном фланге района абсолютные отметки РПВ максимальны и достигают 1400–1550 м, они понижаются в юго-восточном и северо-западном направлениях, где составляют 420–520 м. Фрагменты РПВ низких гипсометрических уровней перекрыты чехлом кайнозойских отложений, в пределах Киинсу-Тройницкого прогиба развиты коры выветривания.

Поднятие региона на неотектоническом этапе обусловило интенсификацию эрозии, расчленение РПВ и формирование денудационно-тектонического и эрозионно-тектонического типов рельефа.

Денудационно-тектонический рельеф, сформированный на участках относительно незначительной деструкции пенеплена, развит преимущественно на западном фланге, менее развит в центральных частях района. Он характеризуется слабой расчлененностью, пологими (от 5 до 10°) склонами, округлыми плавными очертаниями водоразделов. Относительные превышения не более 100 м.

Эрозионно-тектонический рельеф развит на восточном фланге района. Он гораздо более крутосклонный (до 25–30°), относительные превышения достигают 500 м. Основные формы – системы гряд со сглаженными или островершинными гребнями, раз-

деленные в различной степени врезанными, иногда узкими речными долинами, имеющими на отдельных участках V-образный профиль.

Аккумулятивный рельеф, развитый в межгорных впадинах и долинах крупных рек, представлен днищами речных долин, фрагментами речных террас и аллювиально-пролювиальных равнин.

### Древние долины

Специфическими формами рельефа, заслуживающими детального описания, являются древние долины [6]. Палеодолины различаются геоморфологическими особенностями, генезисом и возрастом, выполняющих их рыхлых отложений и россыпной золотоносностью.

По взаимоотношению с современной гидросетью они подразделяются на три типа:

- развивающиеся унаследованно и используемые современными водотоками на всем их протяжении;
- приподнятые отмершие, часто пересекаемые более молодыми эрозионными врезами с действующими водотоками;
- погребенные отмершие в межгорных и грабенообразных впадинах.

В унаследованном режиме развивается подавляющее большинство древних долин крупных рек района. Отмершая приподнятая палеогидросеть развита на правом борту бассейна р. Былкылдак, в верховьях р. Большой Чигилек. Отмершая погребенная гидросеть развита фрагментарно в пределах межгорных и грабенообразных впадин.

Динамический режим древних долин унаследованного развития оказывает наибольшее влияние на характер их россыпной золотоносности.

В перестативном режиме на протяжении четвертичного времени развивались палеодолины бассейнов рек Жанама, Былкылдак, Кызыл-Су, Балажал, верховья р. Чар, Даубай, Ашалы, Боко, Жинишке, Тамды. Долины этого типа широкие, днища их плоские, русловой врез обычно незначительный, террасы или отсутствуют, или их высота не превышает 2 м. По сохранности отложений неогена среди древних долин, развивающихся в перестативном режиме, выделяется два типа:

- с «откопанным» днищем, сложенным преимущественно породами палеозоя;
- с сохранившимися неогеновыми отложениями.

В древних долинах с «откопанным» днищем отложения неогена преимущественно уничтожены эрозией и сохранились фрагментарно в локальных депрессиях (верховья руч. Кожабулак, Елиген-Булак и др.). На некоторых участках (руч. Карамырза) древний аллювий сохранился фрагментарно в бортах долины, а на откопанном днище долины отмечаются многочисленные валуны кварца и, реже, гранитоидов, являющиеся его реликтами.

Инстративный режим развития речных долин, в зависимости от амплитуды неотектонических движений, носил умеренный либо интенсивный характер.

В умеренном инстративном режиме на протяжении четвертичного времени развивались долины рек Агыныкатты, Чар (на ее нижнем отрезке), Сибинка, Шибынды, Жельдыарык. Долины рек, характеризующихся этим режимом развития, преимущественно террасированы, современные русла часто врезаются в поверхность более древних дниц на глубину до 20–30 м с образованием цокольных террас.

В интенсивном инстративном режиме развивались участки долин рек Большая Буконь, Малая Буконь, Большой Чегелек (выше их горного устья в пределах нагорья), а также долины рек Жумба, Кулуджун, Лайлы, Таргын и др. Долины этого типа ущельеобразные с крутыми, часто обрывистыми склонами. Днища их узкие, террасы отсутствуют, аллювий характеризуется высокой валунистостью.

Таким образом, древние долины Калбы разнообразны по условиям своего развития на неотектоническом этапе, что повлекло различия в особенностях и масштабах их россыпной золотоносности.

#### **Геоморфологическая зональность**

Описанные выше типы рельефа и палеодолин имеют зональное распространение, которое определяет размещение разнотипных россыпей. Авторами выделено три геоморфологических области.

Область интенсивных новейших поднятий, характеризующаяся развитием крутосклонного интенсивно расчлененного эрозионно-тектонического рельефа, располагается на восточном фланге района и охватывает осевую часть Калбинского нагорья. Фрагменты РПВ здесь располагаются на абсолютных высотах от 1200 до 1560 м. Они в значительной степени преобразованы в результате эрозионной деятельности. Речные долины (Жумба, Большая Буконь, Таргын, верховья реки Кулуджун, Лайлы и др.) развиваются в интенсивном инстративном режиме. Днища их узкие, глубина эрозионного вреза достигает 500 м.

Переходная зона, занимающая наиболее значительную площадь в центральной части района, характеризуется сочетанием всех типов эрозионно-тектонического и денудационно-тектонического рельефа в комплексе с аккумулятивным рельефом внутригорных впадин. Фрагменты РПВ здесь в различной степени расчленены эрозионными процессами и располагаются преимущественно на абсолютных высотах от 600 до 1000 м. Эта зона характеризуется развитием разнообразных типов палеодолин, межгорных и грабенообразных впадин.

Область слабых и умеренных новейших поднятий, характеризующаяся развитием пологосклонного денудационно-тектонического рельефа, располагается на западном и юго-восточном флангах района. На западном фланге она охватывает левобережье рек Тамды и Жинишке, междуречье рек Чар и Кызылсу, а также бассейны рек Куйелы, Канайка, Уланка. Фрагменты РПВ здесь находятся на абсолютных высотах 500–600 м, реже – до 800 м. Они слабо расчленены эрозией, на отдельных участках перекрыты кайнозойскими отложениями.

#### **История развития рельефа**

Важным условием формирования разнообразных и масштабных россыпей является благоприятная история развития рельефа, детально изученная В.С. Ерофеевым [5]. По представлениям этого исследователя, началу неотектонических движений на территории Калбы предшествовала продолжительная – с верхов раннего мела до раннего эоцена – эпоха пенепленизации и интенсивного химического выветривания. В этот период формировались зоны окисления золоторудных месторождений, происходила дезинтеграция руд и высвобождение свободного самородного золота.

В среднем эоцене проявилась первая (южноалтайская) фаза тектонических движений, что привело к орографическому обособлению Калбинского нагорья, активизации эрозионно-денудационных процессов и появлению в коррелятивных отложениях обломочных фаций. В описываемом районе россыпи этого возраста пока не установлены, в сопредельном же Южно-Алтайском с этой эпохой связано формирование мощных толщ золотоносных кварцевых галечников.

Верхнеэоценовое–нижнеолигоценное время характеризуется затуханием тектонических подвижек, на смену вертикальной эрозии пришли процессы выравнивания рельефа. Аллювиальные отложения характеризуются преобладанием перстративных фаций.

С началом среднего олигоцена связано проявление второй (нарымской) фазы тектонических движений, обусловившей более четкое оформление и эрозионное расчленение Калбинского поднятия. С этим временем связано заложение древней гидросети в пределах поднятия и грабенообразных впадин на его периферии. Реками переносилось значительное количество обломочного материала, в том числе продуктов разрушения окисленных частей золоторудных месторождений. Не исключено, что в этот период происходило инициальное россыпеобразование в Жолдыбайском грабене и древних долинах.

Аральское время (нижний–средний миоцен) характеризуется затуханием тектонических подвижек и изменением палеоклимата в сторону аридизации и похолодания. В Калбинском нагорье продолжались с тенденцией к затуханию эрозионные процессы, с которыми связано формирование золотоносных отложений аральской свиты в Жолдыбайском грабене.

В верхнем миоцене – нижнем плиоцене проявилась энергичная тарбагатайская фаза тектогенеза, приведшая к формированию на территории Калбы низких гор и возвышенных равнин. Климат был умеренно-теплым и сухим, эрозионная деятельность интенсивная в начальные периоды с тенденцией к затуханию. Об этом свидетельствует наличие в основании коррелятивных отложений пачки песков и галечников, выделенных под названием «сарыбулакских» слоев. Перекрывающие их красноцветные песчаные глины с редкими прослоями и линзами щебня (павлодарская свита) являются озерными отложениями [5].

Четвертичный этап характеризуется интенсивными подвижками по зонам активизированных разломов.

С этим временем на отдельных участках связано образование новой гидросети, имеющей секущее направление по отношению к древним долинам, а также формирование четвертичных россыпей золота – преимущественно за счет размыва древнего золотоносного аллювия, в меньшей степени – за счет поступления золота непосредственно из коренных источников.

Сходной историей развития рельефа характеризуются другие крупные золотороссыпные провинции мира. Так, в штате Виктория (Австралия) начало россыпеобразования связано с блоковыми неотектоническими поднятиями плиоценового возраста, что привело к размыву древних слабо золотоносных третичных отложений и накоплению золота в приоценовом аллювии [7]. Богатые россыпи Клондайка (Канада) также сформировались в результате неотектонического поднятия [8]. Формирование россыпей Калифорнии (США) началось в результате раннепалеогеновых неотектонических движений, которые привели к образованию олигоцен-миоценовых и плиоценовых россыпей, перекрытых затем вулканическими породами [9, 10].

Таким образом, характер развития рельефа описываемого района в кайнозойское– четвертичное время благоприятен для образования палеоген-неогеновых россыпей.

#### Россыпная золотоносность

Первые сведения о золотоносных россыпях Калбы относятся к 1800-м гг., когда Коммерции Советник Степан Попов сделал несколько заявок на золотые прииски. В последующие годы золотые прииски охватывали почти всю систему рек Калбы. Золотодобыча достигла расцвета к 1870–1880 гг., после чего она начинает падать и в период 1917–1920-х гг. практически прекратилась.

В последующем поисково-разведочные и тематические работы на россыпи проводились Е.М. Великовской (1938–1946 гг.); Н.И. Баженовым (1955 г.); В.И. Наливаевым (1970 г.); Г.К. Зубовым и др. (1971 г.); Э.В. Окуновым (1976 г.); Г.М. Козловским и др. (1977 г.), А.И. Демченко и др. (1982 г.); Е.М. Александровым и др. (1982 г.); Н.П. Введенской и др. (1983 г.); В.И. Кривцовым и др. (1985 г.); В.И. Наливаевым (1992 г.).

Подавляющее большинство этих исследований было ориентировано на изучение четвертичных неглубокозалегающих россыпей четвертичного возраста, только в работах Е.М. Великовской (1946 г.) и В.И. Наливаева (1992 г.) отмечены значительные перспективы погребенных россыпей в древних долинах.

В период после 1995 г. частными недропользователями, при участии авторов данной статьи, выполнялись геологоразведочные и опытно-эксплуатационные работы.

#### Перспективы древних россыпей золота

Имеющиеся данные (В.И. Наливаев, 1992 г.) [6, 11] свидетельствуют о том, что продуктивность россыпей палеогенового и неогенового возраста многократно превосходит потенциал россыпей четвертичного возраста (табл. 1).

**Таблица 1.** Продуктивность разновозрастных россыпей на площади Западно-Калбинского района (по А.В. Третьякову, [6])

**Table 1.** Productivity of uneven-age placers on the area of the West Kalba district (according to A.V. Tretyakov, [6])

Показатели Indicators	Запасы и прогнозные ресурсы золота разновозрастных россыпей Gold reserves and reserves uneven placers			
	Pg <sub>3</sub> +N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	Q	Total
кг/%; kg/%				
Прогнозная оценка Predictive estimate	37925/14,5	216500/82,75	7196/2,75	261621/100
Апробированные запасы Approved stocks	64,28/0,025		2359,3/32,8	2423,6/0,93

В Калифорнии (США) олигоценные и миоценовые россыпи уникальны по параметрам: из них добыто 454 т золота с содержанием от 2 до 60 г/м<sup>3</sup> [12]. Наиболее богатые россыпи штата Виктория (Австралия) сформированы в плиоцене [13], с палеоген-неогеновыми россыпями связан основной потенциал россыпей Аляски (США) и Клондайка (Канада) [14–18].

Изложенные данные о преобладающей продуктивности палеогеновых и неогеновых россыпей в мире подтверждают представления авторов о высоком россыпном потенциале Западно-Калбинского золотоносного района.

#### Типы древних россыпей золота

Анализ материалов предшествующих исследований и результаты собственных наблюдений авторов [6, 11, 14–16] позволяют выделить следующие типы древних россыпей золота (табл. 2).

Как видно, период формирования древних россыпей охватывал длительный промежуток времени (от олигоцена до плиоцена).

*Наиболее древние, олигоценные, россыпные проявления* изучены в погребенной долине р. Агыныкаты [15], рис. 3.

Олигоценные отложения, залегающие в основании разреза, сложены серыми галечниками, заполнитель песчано-глинистый с синеватым оттенком. Галька средней окатанности представлена кварцем, интенсивно сульфидизированными (пирит, марказит) и разложенными хлорит-серицитовыми сланцами.

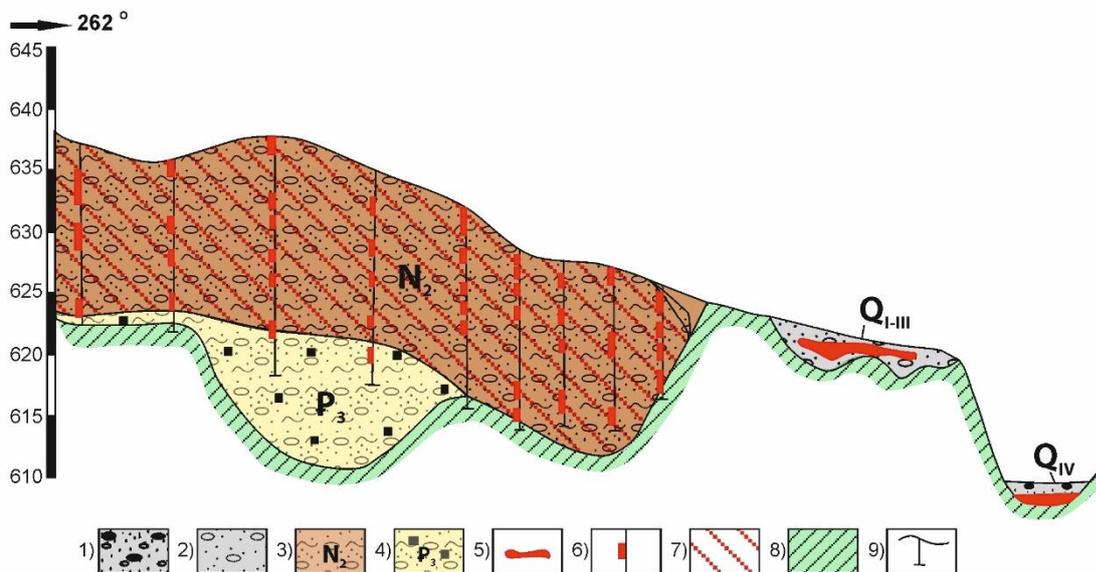
Марказит образует кристаллические агрегаты с тонкошестоватым и радиально-лучистым строением размером от 20 мкм до 1 мм; пирит представлен кристаллическими формами – октаэдрами и их сростками размером от 75 до 100 мкм, преобладающая часть сульфидов является новообразованными. Путем химического разложения марказита и пирита было вскрыто самородное золото. Золотины имеют угловато-комковидную (45 %), пластинчатую (30 %) и изометричную (25 %) форму. Средний размер золотинок – 45×90×140 мкм, минимальный – 7×14×30 мкм, максимальный – 42×25×280 мкм. Морфология и отпечат-

ки на поверхности золотин показывают, что ориентировочно 10 % золотин являются гипергенными, сформированными сингенетично с сульфидами; остальное золото является кластогенным.

**Таблица 2.** Типы древних россыпей золота Западно-Калбинского района и условия их локализации

**Table 2.** Types of ancient gold placers in the West Kalbinsky district and conditions for their localization

Возраст Age	Генетический тип Genetic type	Геолого-геоморфологические условия локализации Geological and geomorphological localization conditions
Олигоцен Oligocene	Аллювиальные Alluvial	В основании разреза аллювия древних долин In the base of the alluvium section of the ancient valleys
Миоцен Miocene	Аллювиально-пролювиальные Alluvial-proluvial	Погребенные в грабенообразных впадинах Buried in graben-shaped depressions
Плиоцен Pliocene	<ul style="list-style-type: none"> <li>Аллювиально-пролювиальные Alluvial-proluvial</li> <li>Пролювиальные Proluvial</li> <li>Аллювиальные Alluvial</li> <li>Аллювиальные, аллювиально-пролювиальные большеобъемные с мелким и тонким золотом (прогнозируются) Alluvial, alluvial-proluvial large with small and thin gold (predicted)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Погребенные в грабенообразных впадинах Buried in graben-shaped depressions</li> <li>Погребенные в древних логах Buried in ancient logs</li> <li>Погребенные в палеодолинах унаследованного развития Buried in paleo-valleys of inherited development</li> <li>Остаточные на высоких цокольных террасах Residual on high ground terraces</li> <li>В отмерших приподнятых палеодолинах Buried in dead raised paleo-valleys</li> <li>Погребенные во внутригорных и грабенообразных впадинах Buried in dead raised paleo-valleys</li> </ul>



**Рис. 3.** Геологический разрез отложений долины р. Агныкатты (составил А.В. Третьяков [15]): 1–4 – аллювиальные отложения: 1 – голоценовые; 2 – средне-верхнечетвертичные; 3 – плиоценовые (сарыбулакские слои), 4 – олигоценные (ашутасская свита); 5 – россыпи в четвертичном аллювии; 6 – золотоносные интервалы разреза плиоценовых и олигоценных отложений; 7 – плиоценовые отложения, перспективные на выявление большеобъемной россыпи с мелким и тонким золотом; 8 – породы плотика; 9 – скважины

**Fig. 3.** Geological section of deposits of the Agnykatty river valley (composed by A.V. Tretyakov [15]): 1–4 – alluvial deposits: 1 – Holocene age, 2 – Mid-upper Quaternary age, 3 – Pliocene age (Sary-Bulak layers), 4 – Oligocene age (the Ashu-Tassuite), 5 – Terracean driver bed placers in the Quaternary alluvium; 6 – gold-bearing intervals of the Pliocene–Oligocene deposit section; 7 – Pliocene deposit section intervals, promising large-volume placers with fine-grained gold; 8 – Paleozoic placer bedrocks; 9 – wells

Пробирным анализом в обломочном материале класса  $-7+2$  мм (36 %) установлено содержание золота 2,0 г/т; в материале класса  $-40+7$  мм (12,6 %) – 2,4 г/т. Золотоносность отложений «на массу» составляет 1,54 г/т.

Интерпретация полученных данных с учетом представлений В.С. Ерофеева [5] позволяет параллелизовать описанные отложения с ашутасской свитой олигоценного возраста.

В миоценовое время сформированы аллювиально-пролювиальные погребенные россыпи грабенообразных впадин. Они выявлены в Жолдыбайском грабене, где общая мощность отложений достигает 80 м. В основании разреза развиты щебенисто-глинистые коры выветривания (1,0–3,5 м). Выше залегают отложения аральской свиты миоцена, представленные светло-зелеными, зеленовато-серыми, пестроцветными запесоченными глинами с прослоями и линзами

песков и гравийно-галечников (от 5 до 60 м). Их с размывом перекрывают отложения павлодарской свиты плицена – запесоченные красно-бурые, коричневые глины с прослоями и линзами песков и гравийно-галечников мощностью от 0 до 29 м. Четвертичные отложения – суглинки со щебнем, глины, пески, галечники и валунно-галечники – от 2 до 8 м.

Россыпная золотоносность отложений аральской свиты установлена в погребенной палеодолине р. Малая Буконь [6], рис. 4. Золотоносный пласт спавевой, мощность торфов достигает 20–27 м. Мощность горизонта аллювия, вмещающего продуктивный пласт, – 5,5–6,0 м, мощность пласта – 1,43 м. Ширина контура россыпи не менее 300 м. Содержание золота в пласте варьирует от 1312 до 5153 мг/м<sup>3</sup>, в среднем 5074 мг/м<sup>3</sup>.

В плиоценовое время формировались аллювиально-пролювиальные россыпи во впадинах, аллювиальные, аллювиально-пролювиальные и пролювиальные россыпи в древних долинах и логах.

Аллювиально-пролювиальные погребенные россыпи впадин известны в Жолдыбайском грабене и древней грабенообразной долине ручья Бюкуй.

В Жолдыбайском грабене, в долине ручья Сухой Майкалган, на глубине 16 м под толщей глин павлодарской свиты вскрыт горизонт гравелистых песков мощностью до 4,0 м, залегающий на коренном плотике (Э.В. Окунев и др., 1976 г.). В подошве аллювиальных отложений установлено содержание золота 3,5; 9,0 и 5,0 г/м<sup>3</sup> при мощности пласта 0,6; 0,7 и 0,8 м.

Мощность песков составляет 0,7 м, среднее содержание золота на пласт – 5800 мг/м<sup>3</sup>.

В долине р. Бюкуй скважинами ударно-канатного бурения (УКБ) вскрыта погребенная грабенообразная долина [16], выполненная отложениями плиоценового возраста (рис. 5).

В отложениях павлодарской свиты содержание золота достигает 519 мг/м<sup>3</sup>. Под ними вскрыта толща коричневых запесоченных глин с прослоями гравийников и песков («сарыбулакские слои» в понимании [5]), на которой красноцветные глины залегают с размывом. Золотоносность «сарыбулакских» отложений установлена в орографически правом тальвеге (рис. 5). Большинство скважин вскрыты маломощные (0,5–1,0 м) пласты с содержаниями 113–1320 мг/м<sup>3</sup>. Одной скважиной выявлена россыпная струя шириной 80 м. Мощность торфов составляет 12 м, мощность песков 8 м, максимальное содержание золота достигает 1761 мг/м<sup>3</sup>, составляя в среднем 621 мг/м<sup>3</sup>. Очевидно, эта струя приурочена к эрозионному врезу второй половины «сарыбулакского» времени в «сарыбулакские» же отложения и сформирована в результате аккумуляции золота, заимствованного из одновозрастного промежуточного коллектора – отложений «сарыбулакских» слоев.

Аллювиальные россыпи древней гидросети, в том числе отмершей приподнятой, приурочены к «сарыбулакским» галечникам, обнажающимся на поверхности либо погребенными под толщей красноцветных глин павлодарской свиты.

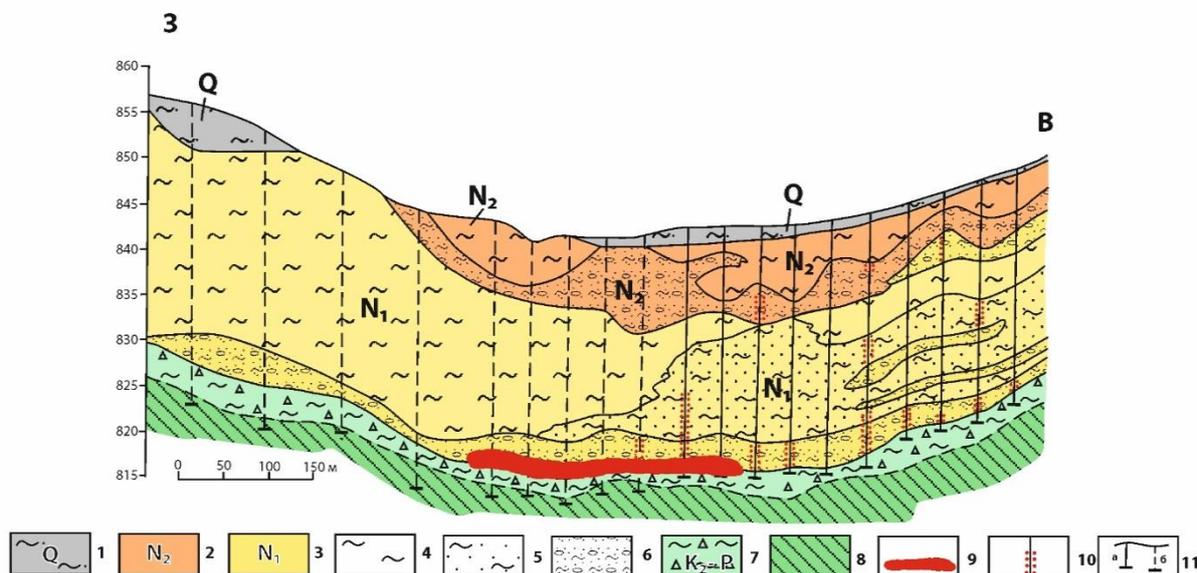
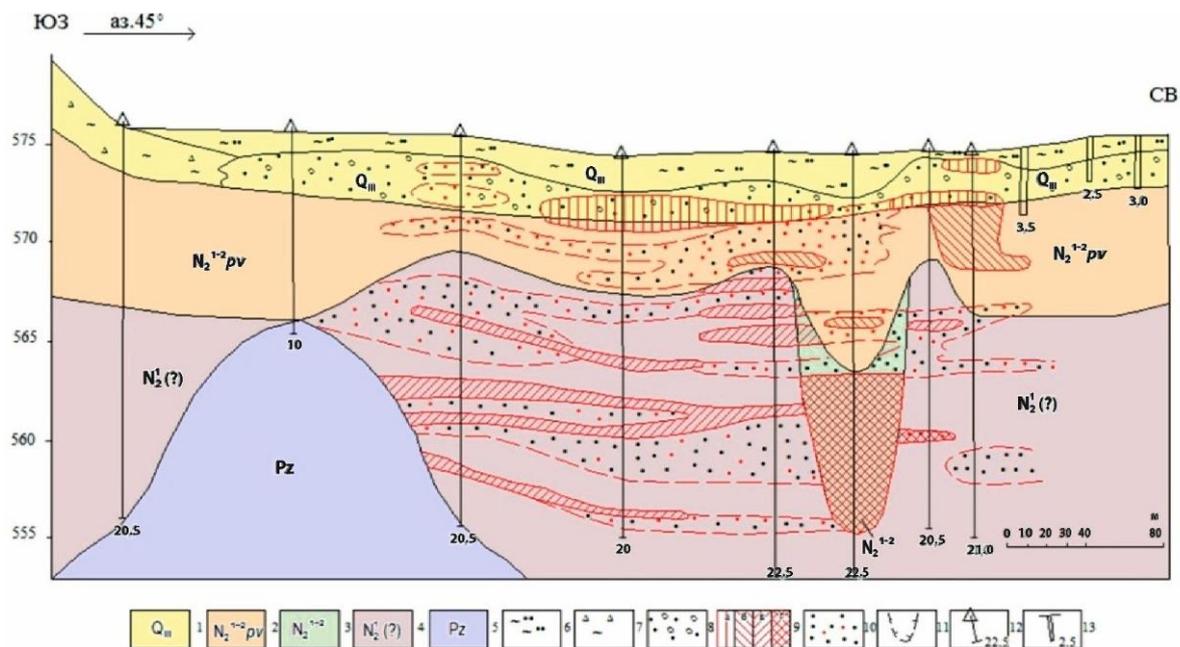


Рис. 4. Геологический разрез участка Мало-Буконьский (составил А.В. Третьяков с использованием материалов ПГО «Востказгеология»): 1 – четвертичные отложения (суглинки); 2, 3 – неогеновые отложения: 2 – миоцен, аральская свита, 3 – плиоцен; 4 – глины; 5 – пески глинистые; 6 – гравийно-галечники; 7 – щебнисто-глинистая кора выветривания мел-палеогенового возраста; 8 – палеозойские породы плотика; 9 – продуктивный пласт россыпи; 10 – интервалы с незначительным весовым содержанием золота; 11 – скважины: а) ударно-канатного бурения, б) бурения комплексом гидровыноса керна

Fig. 4. Geological section of the Small-Bukon plot (composed by A.V. Tretyakov using materials of «PGO Vostokkazgeologia»): 1 – Quaternary rubble-loam; 2, 3 – Neogene deposits: 2 – Miocene, Aral suite, 3 – Pliocene; 4 – clays; gravel rock; 5 – pelitic sands; 6 – gravel and shingle; 7 – rubble-loam residuum; 8 – Paleozoic bedrocks; 9 – producing formation; 10 – intervals with miniscule weight content of gold; 11 – boreholes: a) shock-rope drilling, b) drilling with a core hydraulic removal complex



**Рис. 5.** Геологический разрез грабенообразной долины р. Бюкүй: 1 – четвертичные галечники, супеси, суглинки; 2 – неогеновая система, плиоцен: павлодарская свита: глины красные, редко с включениями гальки и щебня; 3 – переотложенные запесоченные глины сарыбулакских слоев; 4 – неогеновая система, плиоцен, сарыбулакские слои: глины запесоченные с линзами глинистых песков с мелкой галькой; 5 – палеозойские отложения; 6 – супеси; 7 – суглинки со щебнем; 8 – галечники; 9 – пласты с весовым содержанием золота: а) в четвертичных отложениях, б) в породах павлодарской свиты, в) в сарыбулакских слоях, г) в переотложенном материале сарыбулакских слоев; 10 – пласты со знаками золота в разновозрастных отложениях; 11 – эрозионный врез в сарыбулакские слои; 12 – скважины ударно-канатного бурения и их глубина, м; 13 – шурфы и их глубина, м

**Fig. 5.** Geological section of the graben-like Byukui river valley: 1 – upper Quaternary deposits (shingle, sand clay, loam with rubble); 2 – Pliocene, the Pavlodar suite (clays brick-red, sometimes with gravel and rubble); 3 – re-deposited material of Sary-Bulak layers; 4 – Pliocene, Sary-Bulak layers (oversand clays with interlayers of loamy sands with rubble and fine gravel); 5 – Paleozoic deposits undivided; 6 – loamy sand; 7 – loam with rubble; 8 – shingle; 9 – gold-bearing layers with weight content of gold in: a) Quaternary deposits, б) deposits of Pavlodar suite, в) deposits of Sary-Bulak layers, г) re-deposited material of Sary-Bulak layers; 10 – layers with indicative gold content in diverse-age deposits; 11 – limits of erosion cut into deposits of Sary-Bulak layers; 12 – cable drilling boreholes and their depths, m; 13 – prospecting holes and their depths, m

Погребенные россыпи этого типа, где древний аллювий перекрыт глинами павлодарской свиты мощностью до 20–25 м, изучены в бассейне р. Былкыдак (В.И. Наливаев, 1992 г.). Здесь, в верховьях р. Сенташ, скважинами УКБ выявлена погребенная россыпь шириной 185 м при средней мощности пласта 1,2 м (рис. 6).

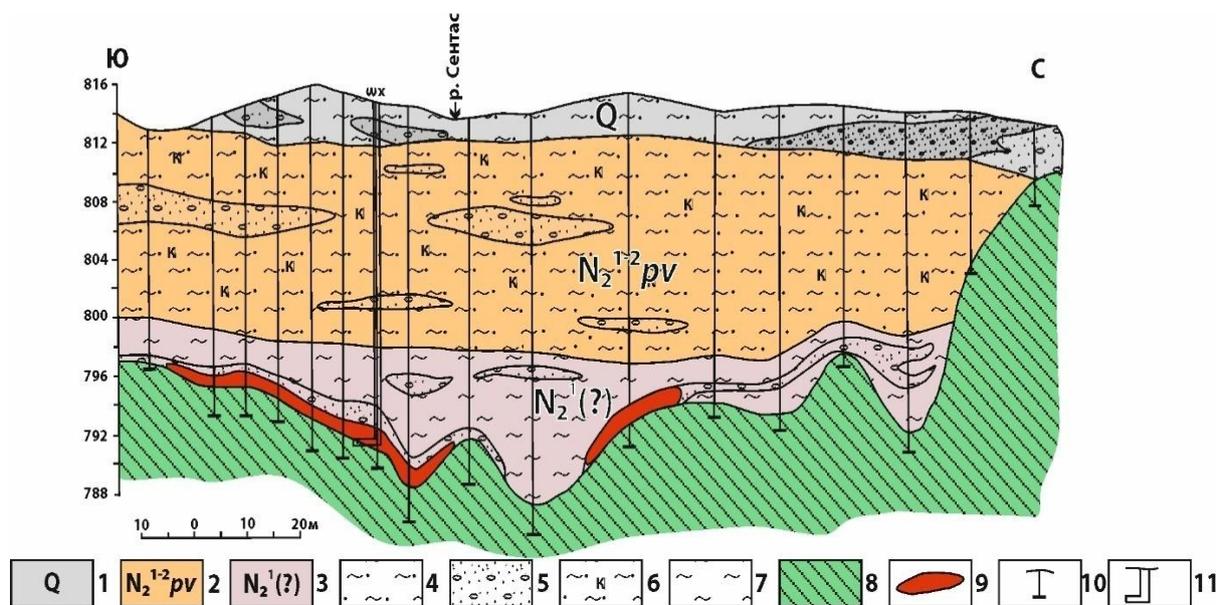
Содержание золота на пласт изменяется от 0,7 до 8,5 г/м<sup>3</sup>, составляя в среднем 3,37 г/м<sup>3</sup>. Поисковыми линиями (Н.П. Введенская, 1983 г.) эта погребенная россыпь прослежена вниз по долине на 11 км.

По данным Г.М. Козловского и др. (1977 г.), В.И. Наливаева (1992 г.) золотоносный погребенный аллювий, залегающий под толщей красноцветных глин павлодарской свиты, развит также в долинах рек Чар, Балажал, Кызыл-Су, Даубай, ручьев Кожабулак, Елиген-Булак и др.

Древние аллювиальные россыпи, где плиоценовый аллювий обнажен на поверхности, развиты в орographicки нижней части древней долины р. Агыныкаты (рис. 2). Верхние интервалы разреза (в интервале 0–17 м) сложены хорошо окатанными аллювиальными валунно-галечниками «сарыбулакских слоев» плиоценового возраста (по [5]). В составе обломочно-

го материала отмечен кварц (до 20–25 %), а также песчаники и алевролиты. Россыпной золотоносностью характеризуется весь разрез плиоценового аллювия, преобладает мелкое и тонкое пластинчатое и листовидное золото.

Остаточные аллювиальные россыпи известны в долине р. Карамырза. Здесь древний аллювий сохранился фрагментарно в бортах долины, а на откопанном днище долины многочисленны валуны кварца (до 0,7 м в поперечнике) и гранитоидов (до 0,5 м), являющиеся реликтами древнего размытого аллювия. Отложения, вмещающие россыпь, представлены суглинками со щебнем и включениями реликтовых валунов кварца. Распределение золота разной крупности в разрезе не характерно для аллювиальных россыпей: наиболее крупные золотины и самородки приурочены к верхней и средней частям разреза, золото мелких и пылевидных классов образует ореол в кровле и подошве пласта. Аналогичное строение описано для россыпей бассейна реки Вулшед-Крик (штат Виктория, Австралия) [13]. По данным этого исследователя, в части этих россыпей обломочный материал был полностью вынесен в результате размыва, а золото сохранилось в верхней части плотика.



**Рис. 6.** Геологический разрез погребенной россыпи долины р. Сенташ (бассейн р. Былкылдак, составлено по материалам ГОКа «Алтайзолото»): 1 – четвертичные отложения; 2, 3 – неогеновые отложения: 2 – павлодарская свита, 3 – «сарыбулакские слои»; 4 – суглинки; 5 – галечники, гравийно-галечники; 6 – глины бурые, буровато-коричневые песчанистые карбонатизированные; 7 – глины серые запесоченные; 8 – песчаники и алевролиты палеозоя; 9 – золотоносный пласт; 10 – скважины ударно-канатного бурения; 11 – шахта периода XIX в.

**Fig. 6.** Geological section of a buried placer in the Sentash river valley (Bylkyldak river basin based on materials of «the GOK Altai Zoloto»): 1 – Quaternary deposits; 2, 3 – Neogene deposits: 2 – Pavlodar formation, 3 – «Sarybulak beds»; 4 – loams; 5 – pebbles, gravel-pebbles; 6 – brown, brownish sandy carbonated clayey clay; 7 – sand-gray clay; 8 – Paleozoic sandstones and siltstones; 9 – gold-bearing layer; 10 – shock-rope drilling; 11 – mine period of the XIX century

Аллювиальные, аллювиально-пролювиальные большие объемы россыпи с мелким и тонким золотом прогнозируются авторами [6] в бассейнах рек Чар, Агыныкатты, Батпак-Булак, Былкылдак и в Жолдыбайском грабене на основании совместного анализа положения этих участков в структуре коренных источников, особенностей их геолого-геоморфологического строения, анализа истории развития гидросети и связанной с ней эволюции россыпеобразования как аналогии россыпей Большой Кураны в Якутии, Нагиминской и Петровской в Амурской области [17]. Их обнаружение прогнозируется в межгорных (участки Средний Былкылдак, Нижнечарский) и грабенообразных (участки Сухой Майкалган, Малобуконьский) впадинах. В сопредельных районах Рудного Алтая на вероятность формирования таких россыпей указывают в [18].

Принципиально механизм формирования и геолого-геоморфологические условия локализации этих россыпей (за счет поступления золота из горного обрамления впадин) сходны с таковым прибрежно-морских россыпей. Так, в золотороссыпном узле Ном (Аляска) богатые аллювиальные россыпи горного обрамления являлись источником масштабных прибрежно-морских россыпей, из которых добыто не менее 188 т золота [19]. Благоприятность условий для накопления тонкого золота в периферических частях «сухих» дельт (конусов выноса современных и древних рек) описана также в [20].

#### Закономерности размещения древних россыпей золота

Главной закономерностью является наличие пространственно-парагенетической связи россыпей с коренными источниками – россыпи всех геолого-геоморфологических типов и возраста тяготеют к внутренним частям и ближайшему обрамлению ареала развития коренных источников (рис. 2).

Геоморфологические закономерности локализации россыпей менее однозначны. Неоднократные фазы активизации эрозионно-тектонических процессов привели к размыву части россыпей и переотложению золота на сопредельных отрезках речных долин, часто в россыпях иного типа. Длительная в целом история россыпеобразования обусловила трансформацию геолого-геоморфологических типов россыпей, но не определила какой-либо геоморфологической ситуации, особо благоприятной для их концентрации.

Вместе с тем, локальная геоморфологическая зональность Западно-Калбинского района обусловила наличие закономерностей размещения разнотипных древних долин и впадин в геоморфологических зонах и как следствие – наличие закономерностей размещения разнотипных древних россыпей, которые известны в переходной геоморфологической зоне и зоне слабых и умеренных поднятий [6].

В переходной геоморфологической зоне развиты следующие типы рельефа: эрозионно-тектонический интенсивно расчлененный крутосклонный (отн. превышения до 300 м); эрозионно-тектонический рас-

члененный мелкогивистый крутосклонный (отн. превышения до 150 м); денудационно-тектонический пологосклонный (отн. превышения не более 100 м); фрагменты располагаются РПВ на абс. высотах от 600 до 1225 м.

В этой зоне развиты все типы древних россыпелокализирующих элементов рельефа: древние долины всех типов (отмершие приподнятые, отмершие погребенные, унаследованного развития, лога древней гидросети, внутригорные и грабенообразные впадины). Это обусловило формирование всего спектра древних россыпей: аллювиально-пролювиальных большеобъемных во впадинах, аллювиальных, в том числе погребенных, в разнотипных палеодолинах и древних логах.

В геоморфологической зоне слабых и умеренных поднятий развит денудационно-тектонический пологосклонный рельеф с относительными превышениями не более 80 м и мелкосопочник; фрагменты РПВ располагаются на абсолютных высотах 500–600 м, на отдельных участках до 800 м. В этой зоне развиты древние долины и лога унаследованного развития и грабенообразные впадины, в которых выявлены погребенные россыпи в древних долинах и логах, прогнозируются аллювиально-пролювиальные большеобъемные россыпи в грабенообразных впадинах.

Как видно, наибольшим разнообразием древних россыпелокализирующих элементов рельефа и, в связи

с этим, перспективами палеогеновых и неогеновых россыпей характеризуется переходная зона.

Таким образом, распределение древних россыпей в Западно-Калбинском районе определяется их пространственно-парагенетической связью с коренными источниками, структура размещения которых определяет структуру размещения россыпей.

Геоморфологические закономерности обусловлены локальной геоморфологической зональностью и определяют геолого-геоморфологический тип россыпей.

#### Выводы

1. Продуктивность россыпей палеогенового и неогенового возраста многократно превосходит потенциал россыпей четвертичного возраста.
2. Палеоген-неогеновые россыпи локализованы в разнотипных древних долинах и впадинах.
3. Формирование древних россыпей в Западно-Калбинском золотоносном районе происходило на протяжении длительного промежутка времени – с олигоцена по плиоцен, что обусловило многообразие их геолого-геоморфологических типов.
4. Основной закономерностью их размещения является пространственно-парагенетическая связь с коренными источниками, структура размещения которых определяет структуру размещения россыпей, в то время как локальная геоморфологическая зональность определяет геолого-геоморфологические типы россыпей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьячков Б.А., Омирсериков М.Ш., Сапаргалиев Е.М., Ойцева Т.А., Кузьмина О.Н., Зимановская Н.А. Научные основы разработки технологии прогнозно-поисковых работ // Инновации и перспективные технологии геологоразведочных работ в Казахстане: Материалы Международной научно-практической конференции «Бекжановские чтения». – Алматы, 2017. – С. 21–26.
2. Щерба Г.Н., Дьячков Б.А., Нахтигаль Г.П. Металлогения Рудного Алтая и Калбы. – Алма-Ата: Изд-во «Наука», 1984. – 240 с.
3. Коробейников А.Ф., Масленников В.В. Закономерности формирования и размещения месторождений благородных металлов Северо-Восточного Казахстана. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1994. – 337 с.
4. Беспяев Х.А., Париров Ю.С. Западно-Калбинский золоторудный пояс (Восточный Казахстан). – Алматы: Изд-во «Комплекс», 2018. – 215 с.
5. Ерофеев В.С. Геологическая история южной периферии Алтая в палеогене и неогене. – Алма-Ата: Изд-во «Недра», 1969. – 165 с.
6. Третьяков А.В. Формирование, закономерности размещения и перспективы россыпной золотоносности Востока Казахстана. – Алматы: Изд-во «Комплекс», 2009. – 260 с.
7. Dunn E.I. Geology of gold. – London: Charles Griffin and Co., Ltd., 1929. – 303 p.
8. Boyle R.W. The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element // Bulletin of the Geological Survey. – 1979. – № 280. – P. 15–35.
9. Alber I.P. A lithologic-tectonic framework for the metallogenic problems of California // Economic Geology. – 1981. – V. 76. – № 4. – P. 765–790.
10. Burnett I.L. Gold mining in California // California-Geology – 1985. – P. 158–196.
11. Третьяков А.В. Развитие представлений К.И. Сатпаева о перспективах древних россыпей золота в Казахстане // Инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики Республики Казахстан: Труды Сатпаевских чтений. – 2019. – Т. 1. – С. 110–117.
12. Tarr W.A. Introductory economic geology. – New York; London: McGraw-Hill Book Company Inc., 1930. – 664 p.
13. Geology of Australian ore deposits. Mineralogy and Metallurgy Congress. 2nd ed. / Ed. by J. McAndrew. – Australia; New Zealand, Melbourne, 1965. – V. 1. – P. 29–60.
14. Le Barge W., Naumov V.A. New results on the stratigraphy and placer gold potential of central Yukon // Yukon Exploration and Geology. – 2008. – V. 1. – P. 1–25.
15. Третьяков А.В., Перегудов В.В. Новые данные о золотоносности кайнозойских отложений древних долин Калбинского района // Геология и охрана недр. – 2016. – № 1. – С. 49–53.
16. Третьяков А.В., Медеуов М., Алимханов М.С. Россыпная золотоносность центральной части бассейна р. Бюкуй (Восточный Казахстан) // Геология и охрана недр. – 2018. – № 3 (68). – С. 51–57.
17. Патык-Кара Н.Г. Многопластовые россыпи приразломных впадин // Россыпные месторождения России и других стран СНГ. – М.: Изд-во «Научный мир», 1997. – С. 92–98.
18. Глеулес Н.Ж., Слямбаева А.А., Аналиева Б.Б. Золотоносные россыпи Южного Алтая и их оценка // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 120-летию К.И. Сатпаева. – Усть-Каменогорск, 12 апреля 2019. – С. 160–163.
19. Nokleberg W.J., Bundtzen T.K., Berg H.C. Significant metalliferous lode deposits and placer districts of Alaska // United States Geological Survey Bulletin. – 1987. – № 1786. – P. 35–70.
20. Cook D.S., Rao P.D. Distribution, analysis, and recovery of fine gold from alluvial deposits. – Fairbanks: Mineral Industry Research Lab. and Department of Mineral Engineering, University of Alaska, 1973. – Report № 32. – 101 p.

Поступила 29.10.2019 г.

**Информация об авторах**

*Третьяков А.В.*, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геологических наук им. К.И. Сатпаева, Университет Сатпаев.

*Нигматова С.А.*, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геологических наук им. К.И. Сатпаева, Университет Сатпаев.

*Габитова У.Б.*, научный сотрудник Института геологических наук им. К.И. Сатпаева, Университет Сатпаев.

UDC 553.411

## TYPES, DISTRIBUTION AND PERSPECTIVES OF PALEOGENE AND NEOGENE ALLUVIAL GOLD IN WEST-KALBA GOLD-BEARING DISTRICT (EAST KAZAKHSTAN)

Alexander V. Tretyakov<sup>1</sup>,  
alexret\_1210@mail.ru

Saida A. Nigmatova<sup>1</sup>,  
nigmatova@mail.ru

Umil B. Gabitova<sup>1</sup>,  
umil@bk.ru

<sup>1</sup> Satpaev University,  
69, Kabanbai Batyr street, Almaty, 050010, Kazakhstan.

**The relevance** of the research is conditioned by the need to expand the raw mineral base of the gold-mining enterprises of the Republic of Kazakhstan and scientific substantiation of prospects of involvement into exploitation of Paleogene and Neogene alluvial gold deposits, their formation conditions and placement patterns not being comprehensively assessed so far, despite the fact of their productivity is a very large multiple of the potential of the Quaternary alluvial gold.

**The aim** of the research is to strengthen the raw mineral base of alluvial gold deposits of the Republic of Kazakhstan, increase its development efficacy on account of studies of the paleographic, paleoclimatic and neotectonic conditions of the Cenozoic placer localization and detailing the criteria of their research in the area of the West Kalba gold-bearing district, East Kazakhstan.

**Objects:** Paleogene and Neogene alluvial gold, the ancient placer-localising relief and hosting rocks.

**Methods:** analysis of the existing data on alluvial gold of the Paleogene and Neogene age, further elaboration of characteristics of ancient valleys and intermontane depressions by deciphering satellite images; carrying out the geological and geomorphological observation, mapping of the Paleogene and Neogene deposits, study of their gold-content, complex detailed study and sampling of the most complete sections.

**Results.** It is established that the Paleogene and Neogene alluvial gold is localized in ancient valleys and depressions, their formation period lasting the significant time interval, from the Oligocene to the Pliocene. They are represented by alluvial, alluvial-proluvial and proluvial placers, including the large-volume alluvial-proluvial placers, localized in depressions and dominated by small fine gold. The Paleogene and Neogene placers are distributed according to spatial-paragenetic relation with route sources, and their geological and geomorphological types are defined by the local geomorphological zonality.

### Key words.

Paleogene and Neogene alluvial gold, ancient valleys, ancient depressions, buried placers, the West Kalba gold-bearing district.

### REFERENCE

- Dyachkov B.A., Omirserikov M.Sh., Sapargaliev E.M., Oytseva T.A., Kuzmina O.N., Zemanovskaya N.A. Nauchnye osnovy razrabotki tekhnologii prognozno-poiskovykh rabot [Scientific basis for development of technology of forecasting and prospecting]. *Innovatsii i perspektivnye tekhnologii geologorazvedochnykh rabot v Kazakhstane. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Bekzhanovskie chteniya»* [Novation and prospective techniques of exploration in Kazakhstan. Proc. of the International scientific conference]. Almaty, 2017. pp. 21–26.
- Shcherba G.N., Dyachkov B.A., Nakhtigal G.P. *Metallogeniya Rudnogo Altaya i Kalby* [Metallogeny of Ore Altai and Kalba]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1984. 240 p.
- Korobeynikov A.F., Maslennikov V.V. *Zakonomernosti formirovaniya i razmeshcheniya mestorozhdeniy blagorodnykh metallov Severo-Vostochnogo Kazakhstana* [Laws of formation and location of deposits of noble metals of North-Eastern Kazakhstan]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1994. 337 p.
- Bespaev Kh.A., Parilov Yu.S. *Zapadno-Kalbinskiy zolotorudnyy poyas (Vostochny Kazakhstan)* [The West Kalbin gold belt (Eastern Kazakhstan)]. Almaty, Kompleks Publ., 2018. 215 p.
- Erofeev V.S. *Geologicheskaya istoriya yuzhnoy periferii Altaya v paleogene i neogene* [Geological history of the southern periphery of Altai in the Paleogene]. Alma-Ata, Nedra publ., 1969. 165 p.
- Tretyakov A.V. *Formirovanie, zakonomernosti razmeshheniya i perspektivy rossiynoy zolotonosnosti Vostoka Kazakhstana* [Formation, placement patterns and prospects for placer gold of the East Kazakhstan]. Almaty, Kompleks Publ., 2009. 260 p.
- Dynn E.I. *Geology of gold*. London, Charles Griffin and Co., Ltd., 1929. 303 p.
- Boyle R.W. The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element). *Bulletin of the Geological Survey*, 1979, no. 280, pp. 15–35.
- Alber I.P. A lithologic-tectonic framework for the metallogenic problems of California. *Economic Geology*, 1981, vol. 76, no. 4, pp. 765–790.
- Burnett I.L. Gold mining in California. *California-Geology*, 1985, pp. 158–196.
- Tretyakov A.V. Razvitie predstavleniy K.I. Satpaeva o perspektivakh drevnikh rossypey zolota v Kazakhstane [Development of Satbayev's ideas about the prospects of ancient gold placers in Kazakhstan]. *Innovatsionnye tekhnologii – klyuch k uspešnomu resheniyu fundamentalnykh i prikladnykh zadach v rudnom i neftegazovom sektorakh ekonomiki Respubliki Kazakhstan* [Innovative technologies are the key to the successful solution of fundamental and applied problems in the ore and oil and gas sectors of the economy of the Republic of Kazakhstan]. Almaty, 2019. Vol. 1, pp. 110–117.
- Tarr W.A. *Introductory economic geology*. New York, London, McGraw-Hill Book Company Inc., 1930. 664 p.
- Geology of Australian ore deposits. Mineralogy and Metallurgy Congress*. 2<sup>nd</sup> ed. Ed. by J. McAndrew. Australia, New Zealand, Melbourne, 1965. Vol. 1, 235 p.
- Le Barge W., Naumov V.A. New results on the stratigraphy and placer gold potential of central Yukon. *Yukon Exploration and Geology*, 2008, vol. 1, pp. 1–25.
- Tretyakov A.V., Peregudov V.V. Novee dannye o zolotonosnosti kaynozoysskikh otlozheniy drevnikh dolin Kalbinskogo rayona [New data on the gold-bearing Cenozoic deposits of the ancient valleys of the Kalba region]. *Geologiya i okhrana nedr*, 2016, no. 1, pp. 49–53.

16. Tretyakov A.V., Medeuov M., Alimkhanov M.S. Rossypnaya zolotonosnost tsentralnoy chasti basseyna r. Byukuy (Vostochny Kazakhstan) [Placer gold in the central part of the Bukui River Basin (Eastern Kazakhstan)]. *Geologiya i okhrana nedr*, 2018, no. 3 (68), pp. 51–57.
17. Patyk-Kara N.G. Mnogoplastovye rossypi prirazlomnykh vpadin [Multilayer placers of fault troughs]. *Rossypnye mestorozhdeniya Rossii i drugikh stran SNG* [Placer deposits of Russia and other CIS countries]. Moscow, Nauchniy mir Publ., 1997. pp. 92–98.
18. Tleules N.Zh., Slyambaeva A.A., Analieva B.B. Zolotonosnye rossypi Yuzhnogo Altaya i ikh otsenka [Southern Altai gold placers and their evaluation]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 120-letiyu K.I. Satpaeva* [Materials of the international scientific-practical conference dedicated to the 120<sup>th</sup> anniversary of K.I. Satpayev]. Ust-Kamenogorsk, 12 April 2019. pp. 160–163.
19. Nokleberg W.J., Bundtzen T.K., Berg H.C. Significant metalliferous lode deposit and placer districts of Alaska. *United States Geological Survey Bulletin*, 1987, no. 1786, pp. 35–70.
20. Cook D.S., Rao P.D. *Distribution, analysis and recovery off in gold from alluvial deposits*. Fairbanks, Mineral Industry Research Lab. and Department of Mineral Engineering, Universiti of Alaska, 1973. Report no. 32, 101 p.

Received: 29 October 2019.

#### Information about the authors

**Alexander V. Tretyakov**, Dr. Sc., senior researcher, Satpaev University.

**Saida A. Nigmatova**, Dr. Sc., senior researcher, Satpaev University.

**Umil B. Gabitova**, researcher, Satpaev University.

УДК 622.834

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА ВОРОНКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМАМИ С БЛОЧНЫМ ОБРУШЕНИЕМ

Ефремов Евгений Юрьевич<sup>1</sup>,  
Efremov-eu@mail.ru

Дорохов Дмитрий Владимирович<sup>2</sup>,  
niz36@mail.ru

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

<sup>2</sup> Карагандинский государственный технический университет,  
Республика Казахстан, 100027, г. Караганда, бульвар Мира, 56.

**Актуальность.** Складирование отвальных пород в области обрушения подземных горных работ – один из рациональных методов отвалообразования, способствует экономии земельных ресурсов, уменьшению транспортного плеча доставки и др. Однако совмещение открытых и подземных горных работ – опасный производственный процесс, требующий специальных мер организации труда. Работа посвящена вопросам безопасности при отвалообразовании на земной поверхности в зоне обрушения действующих подземных рудников.

**Цель:** разработка методов мониторинга и оценки состояния процесса воронкообразования для организации процессов по засыпке воронок обрушения и формированию отвала при работе в зоне обрушения.

**Методы:** создание модели воронкообразования, связывающей объем воронки обрушения с объемом очистного пространства посредством коэффициента разрыхления обрушенного массива; разработка критерия оценки стадии воронкообразования. Критерием завершения роста воронок обрушения является увеличение воронки до максимально возможного объема, зависящего от параметров очистной выработки. Определение коэффициента разрыхления *in situ* для условий первичных и вторичных воронок обрушения.

**Результаты.** Разработана классификация этапов процесса воронкообразования. Установлена величина коэффициента разрыхления обрушенных пород в специфических условиях Соколовского месторождения при наличии мощного осадочного чехла, покрывающего комплекс скальных палеозойских пород. Коэффициент разрыхления обрушенного массива, определенный для условий первичных воронок обрушения, находится в рамках 1–1,4; зависит от соотношения осадочных и скальных пород в массиве над выработанным пространством. Для условий вторичного воронкообразования коэффициент разрыхления составляет около 1,0.

### Ключевые слова:

Воронка обрушения, коэффициент разрыхления, зона обрушения, блочное обрушение, воронкообразование, мониторинг деформаций, беспилотный летательный аппарат, цифровая модель рельефа.

### Введение

Разработка полезных ископаемых системой с обрушением выработанного пространства приводит к образованию зоны обрушения на земной поверхности [1, 2]. При этом существенные площади выводятся из хозяйственного оборота. Складирование скальных пород в зону обрушения, наряду с другими способами рационального отвалообразования [3], приводит к экономии земельных ресурсов, и в зависимости от горнотехнической ситуации может приносить дополнительные выгоды. Среди них уменьшение транспортного плеча доставки вскрышных пород и снижение рисков прорывов воды в горные выработки, т. к. зияющие воронки служат коллекторами поверхностных или грунтовых вод, а каналы обрушения – путями перетока накопленной воды в горные выработки [4, 5].

Однако организация работ на земной поверхности шахтного поля – опасный производственный процесс, требующий обеспечения промышленной безопасности. Несоблюдение мер безопасности может привести к трагедии. Так, в 2013 г., при доработке поверхностных запасов над шахтой «Сарановская» в Пермском крае во вновь образованную воронку провалились

пять единиц техники. Чрезвычайное происшествие произошло ночью, поэтому по чистой случайности ни один человек не пострадал, однако имуществу рудника был нанесен серьезный ущерб.

Основной источник опасности для персонала и техники – непогашенные очистные выработки и нелокализованные пустоты в обрушенных породах, образующиеся при консольном зависании окружающего массива (консольное зависание – явление частичного сохранения сплошности массива налегающих пород с массивом, окружающим выработанное пространство, как правило, со стороны висячего бока, рис. 1). Непогашенные пустоты образуются с момента начала очистных работ, поддаются учёту и впоследствии погашаются. При этом на земной поверхности огораживается зона ожидаемого воронкообразования, доступ в которую запрещен.

Особую опасность представляют нелокализованные пустоты, возникающие при консольном зависании. Во время их самоликвидации возникает большой риск выхода обрушения в существующую воронку, в которой производятся работы по ее засыпке. Определение наличия нелокализованных пустот на конкрет-

ном участке работ, в том числе при современных комбинированных системах разработки [6, 7], представляет научно-техническую задачу, важную для обеспечения промышленной безопасности.

Данное исследование направлено на изучение процесса сдвижения при подземной разработке в специфических условиях Соколовского железорудного месторождения. Его результатом является разработка критериев завершения процесса воронкообразования и инструментальная методика мониторинга развития воронок обрушения для обеспечения условий промышленной безопасности на земной поверхности над шахтным полем.

#### Условия воронкообразования на Соколовском месторождении

Шахта «Соколовская» расположена на северном фланге Соколовского месторождения, добыча руды ведется подземным способом системой с обрушением кровли. Отметка земной поверхности составляет около 185 м.

Рудные тела прослежены в палеозойском комплексе пород с отметки +30 м и ниже, угол падения 55–85°, в восточном направлении (рис. 1). Руды и вмещающие породы месторождения в целом характеризуются как слабоустойчивые и неустойчивые, склонные к самообрушению, причем с глубиной отработки запасов их устойчивость в подземных горных выработках возрастает весьма незначительно. Руды, как правило, менее устойчивы, чем вмещающие породы. В целом по месторождению среднеустойчивые породы составляют около 5 %, слабоустойчивые – 60 %, неустойчивые – 35 %.

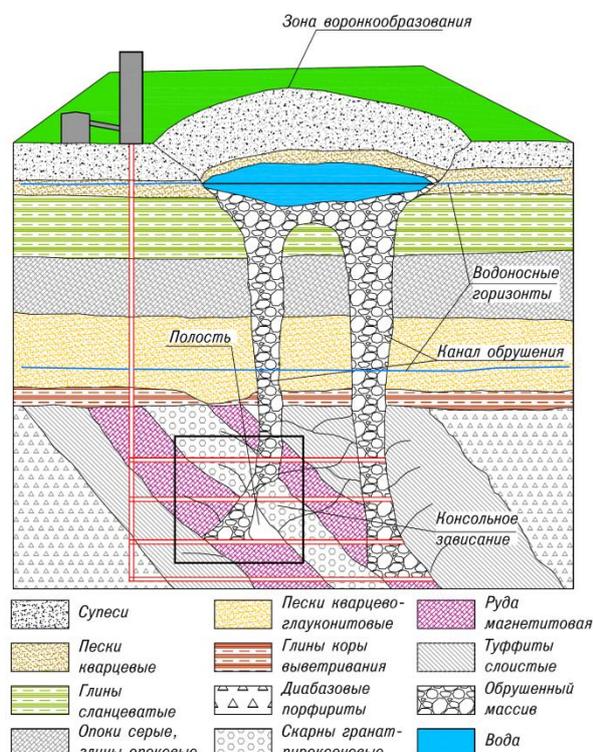


Рис. 1. Схематичный разрез Соколовского месторождения  
 Fig. 1. Schematic section of the Sokolovskoe ore deposit

На данный момент очистные горные работы проводятся на двух рабочих горизонтах –260 и –330 м, глубина которых от поверхности 465 и 515 м соответственно.

Месторождение перекрыто осадочным чехлом, мощность которого составляет около 110–115 м. Чехол сложен чередующимися слоями глин, песка, опок, супесей и суглинков. Отложения имеют горизонтальное залегание и обводнены, выделяются два основных водоносных горизонта, верхний приурочен к пескам олигоценного возраста. Пески залегают на кровле чеганских глин, отметка уровня воды около 175 м. Вмещающими породами нижележащего водоносного горизонта являются меловые пески, отметка уровня воды около 95 м (рис. 1).

При обрушении кровли, после посадки междуканнерных целиков, быстро формируется трубообразная воронка обрушения, достигающая земной поверхности, практически с любой глубины. Часть воронок обрушения при выходе на поверхность отклоняется в сторону, согласованную с углом падения рудных тел.

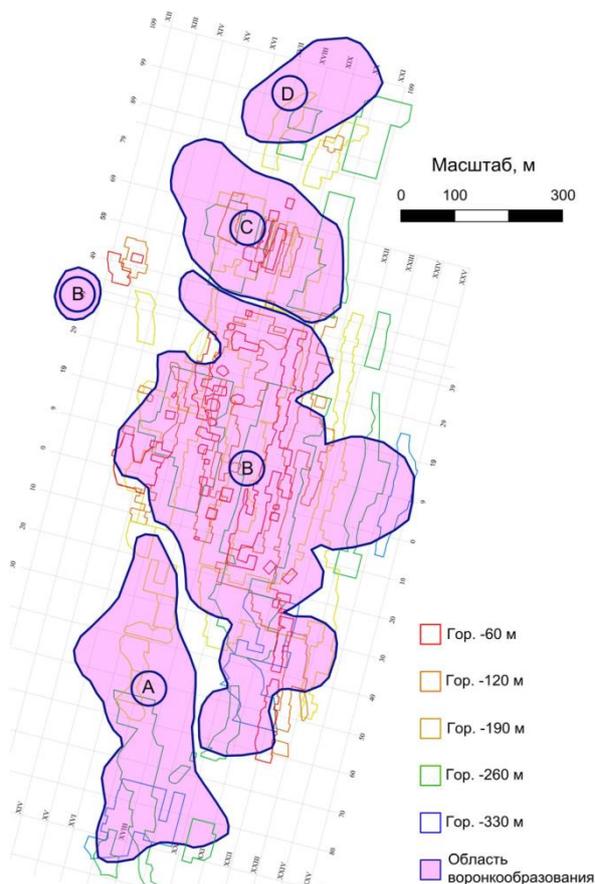


Рис. 2. Зона обрушения Соколовского месторождения: сиреневым цветом тонирована зона обрушения, латинскими буквами обозначены группы связанных воронок, цветными линиями показаны контуры очистных выработок в соответствии с рабочими горизонтами

Fig. 2. Caved zone of the Sokolovskoe ore deposit: zone of collapse is tinted lilac, groups of glory holes are marked in Latin letters, the contours of the undercuts are depicted with colored lines in accordance with the working horizons

Развитие зоны обрушения вверх характеризуется систематически незначительным сужением (уменьшением горизонтальных размеров), что при выходе ее на поверхность приводит к консольному зависанию необрушенных частей массива. В дальнейшем происходит обламывание консольных зависаний и расширение зоны обрушения [8].

На поверхности шахтного поля сформировалась зона обрушения, обладающая сложным строением. Размер области обрушения составляет 1,6 км по простиранию и 0,6 км вкрест. Многочисленные первичные и повторные выходы объединены в четыре группы, в основном повторяют геометрию отработанных рудных тел (рис. 2).

#### Методы исследования

Обрушению кровли выработанного пространства, соотношению глубины горных работ и высоты очистных выработок в горном деле уделяется достаточное внимание [9]. Развиваются методы определения высоты развития свода обрушения кровли очистных выработок и оценка риска появления воронок обрушения на основе геометрических параметров выработок и физико-механических характеристик пород [10–12]. Существуют исследования, посвященные изучению механизма перемещения горных пород в процессе воронкообразования [13] и проявлению сдвижения на земной поверхности [14].

Методы мониторинга и критерий безопасности обусловлены процессом воронкообразования. Развитие воронки обрушения на поверхности можно условно описать тремя стадиями:

- 1) появление воронки. Обрушение кровли начинается после накопления критического объема пустот и обрушения свода очистных выработок. Величина пустого пространства для разных участков различна. Минимальные значения составляют около 8 тыс. м<sup>3</sup>, максимальные превышают 200 тыс. м<sup>3</sup>. Процесс разрушения кровли определяется величиной и соотношением напряжений в массиве и прочностными характеристиками массива пород [15, 16].
- 2) увеличение воронки. Продолжается в течение периода очистных работ в данной выработке и несколько дней–недель после. В процессе обрушения образуются и разрушаются участки консольного зависания. Вышележащие осадочные обводненные породы перемещаются вниз, в пространство между обрушенными скальными породами, откладываются или проникают в горные выработки, вызывая аварии. На поверхности этот период характеризуется увеличением размеров и объемов воронки обрушения. Увеличение воронок происходит не постепенно, а дискретно, резким увеличением на несколько тысяч м<sup>3</sup>. Длительность этой стадии может продолжаться от нескольких дней до десятков лет [17, 18].
- 3) устоявшаяся воронка. Наступает через некоторое время после окончания или приостановки очистных работ. Характеризуется относительным постоянством объема. Незначительное увеличение происходит за счет уплотнения обрушенных по-

род. Борта воронки при этом могут выполаживаться. Развитие процесса определяется главным образом последующим развитием очистных работ в данной и/или в соседних очистных единицах.

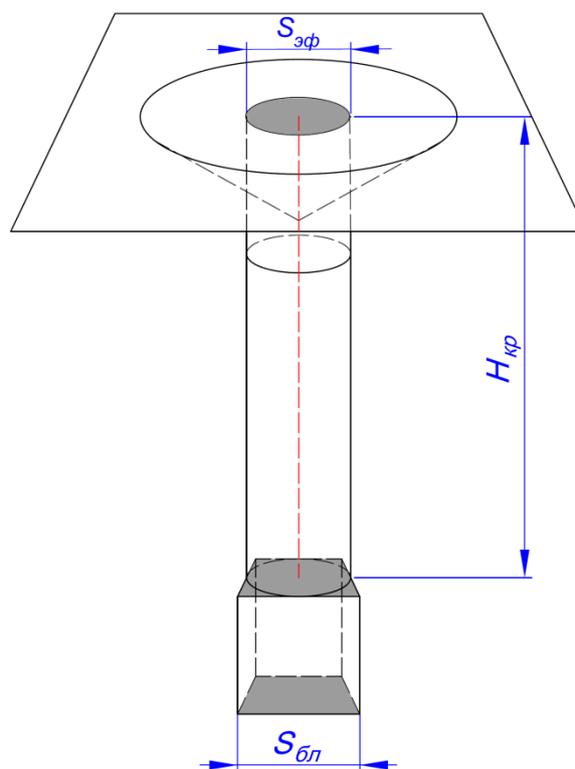


Рис. 3. Расчетная модель воронки обрушения:  $S_{эф}$  – эффективная площадь сечения очистного блока,  $S_{бл}$  – площадь среднего сечения очистного блока,  $H_{кр}$  – глубина кровли очистного блока

Fig. 3. Model of glory hole:  $S_{эф}$  – the effective cross-sectional area of the slope,  $S_{бл}$  – the average section area of the slope,  $H_{кр}$  – roof depth of the slope

Нормативные документы допускают возможность работ в зоне обрушения в случае, если процесс воронкообразования завершился, что соответствует третьей стадии развития воронки обрушения. Критерием перехода процесса воронкообразования к третьей стадии является условие равенства объема воронки расчетному объему, определяемому объемом очистной единицы и коэффициентом разрыхления обрушенного массива. Исследованиям коэффициента разрыхления при обрушениях уделяется внимание в литературе [19, 20]. В рамках данного исследования коэффициент разрыхления обрушенного массива – безразмерная величина, определяемая как изменение объема пород в процессе самообрушения и/или принудительного обрушения, или, иными словами, – отношение объема обрушенного массива  $V_{обр}$  к объему массива до обрушения  $V_m$ , или

$$K_p = \frac{V_{обр}}{V_m}$$

Расчетный максимальный объем определяется следующим образом (рис. 3):

$$V_{\text{изм}} \geq V_{\text{расч}} = V_{\text{бл}} - V_{\text{м}}(K_{\text{р}} - 1),$$

где  $V_{\text{изм}}$  – измеренный объем воронки обрушения (п. 4.6);  $V_{\text{расч}}$  – расчетный объем воронки обрушения;  $V_{\text{бл}}$  – объем пустот очистной единицы;  $V_{\text{м}}$  – начальный объем массива над очистным пространством;  $K_{\text{р}}$  – коэффициент разрыхления обрушенного массива над очистным пространством.

Исходный объем массива над очистным пространством определяется как

$$V_{\text{м}} = S_{\text{эф}} H_{\text{кр}},$$

где  $H_{\text{кр}}$  – расстояние от кровли до земной поверхности;  $S_{\text{эф}}$  – эффективная площадь разрушаемого горизонтального сечения кровли камеры.

При моделировании процесса используется допущение: при условии, что глубина работ значительно (более чем в 5 раз) превышает линейные размеры очистных единиц, площадь эффективного горизонтального сечения в процессе развития обрушения остается постоянной от кровли камеры до земной поверхности, не зависит от формы выработанного

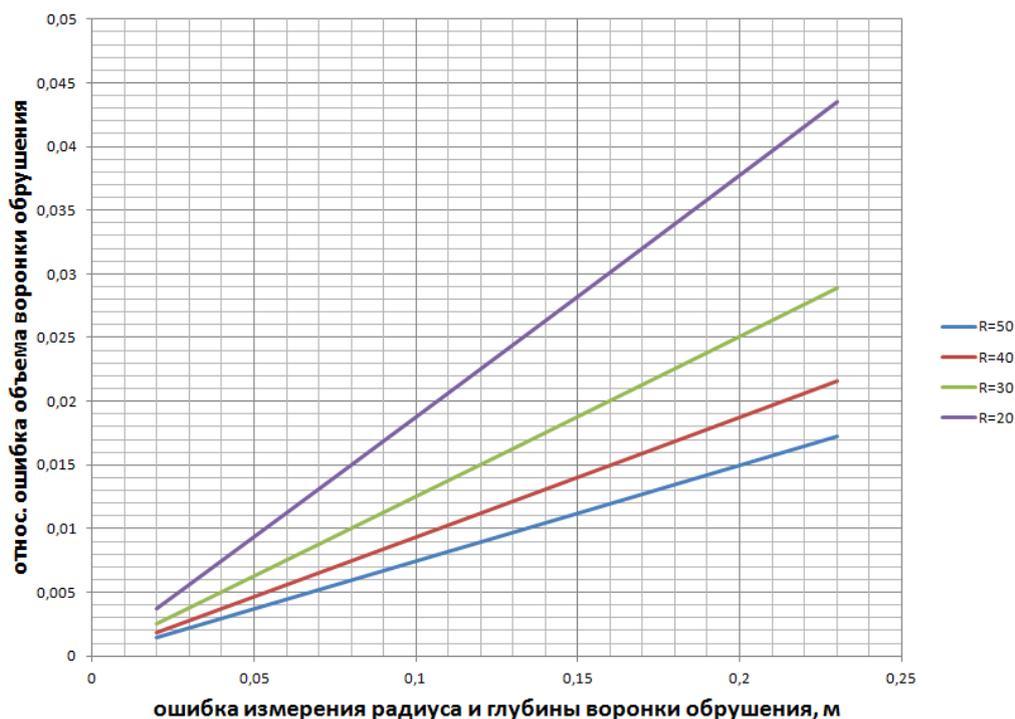
пространства и связана следующим отношением с площадью очистного блока:

$$S_{\text{эф}} = \frac{\pi}{4} S_{\text{бл}},$$

где  $S_{\text{бл}}$  – средняя площадь горизонтального сечения очистной единицы,  $\text{м}^2$  (рис. 2).

Данное допущение подтверждается практическими наблюдениями размеров площадей воронок на поверхности земли, близких к площадям горизонтального сечения выработок, результатами разведочного бурения, а также экспериментами по моделированию обрушения кровли эквивалентными материалами [8].

Определение объема воронок производится с помощью геодезических методов. В последние годы хорошо себя зарекомендовала фотограмметрическая съемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Данный метод обеспечивает приемлемую точность при высокой производительности и небольших затратах на оборудование и полевые работы [21–24]. На основе снимков создается трехмерная модель рельефа, в которой легко производить измерение объемов.



**Рис. 4.** Диаграмма зависимости относительной ошибки определения объема конусовидной воронки от ошибки определения радиуса и глубины

**Рис. 4.** Dependence of a relative error of determining the volume of the conical funnel on the error of determining the radius and depth

Оценено влияние ошибки определения радиуса и глубины воронки обрушения на относительную ошибку объема воронки (рис. 4). Относительная ошибка объема определялась из условия, что погрешности определения радиуса и глубины воронки равны между собой. Оценка проводилась для воронок радиусами 20, 30, 40 и 50 м при угле естественного откоса

в наносах 30 градусов. Оценивалась ошибка определения радиуса и глубины воронки для среднеквадратических ошибок в диапазоне 0,02–0,23 м. Из диаграммы видно, что влияние погрешности измерения радиуса и глубины величиной в 20 см при радиусе воронки 20 м не превысит 5 %, а при радиусе 50 м – 2 % от объема воронки обрушения.

Современные методы съемки и обработки фотограмметрии позволяют получить точность трехмерной модели на уровне первых сантиметров. Таким образом, в реальных условиях относительная ошибка определения объема воронки фотограмметрическими методами не будет превышать одного процента.

#### Результаты определений

Коэффициент разрыхления обрушенного массива зависит от условий выхода воронки. Так, при прохождении канала обрушения через существующую зону обрушения, породы в которой находятся в разрушенном состоянии, коэффициент разрыхления *априори* должен составлять значение близкое единице, в отличие от условий обрушения в нетронutom массиве.

В связи с вышеизложенным коэффициент разрыхления обрушенного массива определялся для двух случаев:

1. Первичные воронки обрушения.
2. Вторичные воронки обрушения.

Под первичными воронками обрушения подразумеваются воронки, канал обрушения которых не пересекает очистные работы вышележащих горизонтов. В предыдущих исследованиях был произведен анализ объемов первичных воронок обрушения [25]. Для определения были использованы архивные данные измерения воронок с 1981 по 2017 гг., которые сопоставлялись с объемами очистных выработок. За отчетный период измерения проводились с помощью теодолитов и электронных тахеометров. Из сотни зарегистрированных воронок условиям, которые соответствуют первичным воронкам, для анализа удовлетворяют 28 выходов обрушения с глубиной кровли 240 до 440 м. Результаты анализа демонстрируют, что коэффициент разрыхления обрушенного массива исследованных воронок лежит в диапазоне 1,01–1,4, среднеквадратичное отклонение составляет 0,08. Имеется, несмотря на существенный разброс, тенденция уменьшения коэффициента разрыхления с глубиной работ (рис. 5).

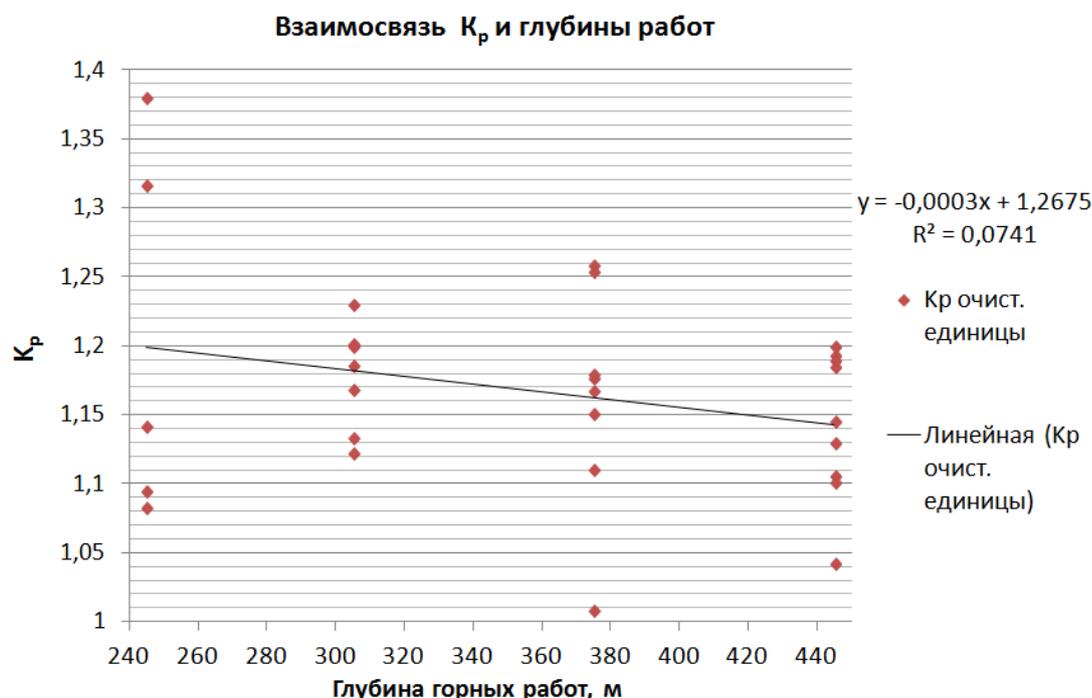


Рис. 5. Результаты определения коэффициента разрыхления обрушенного массива для первичных воронок

Fig. 5. Results of determining the swell factor of the rock caved mass for the first glory holes

Данное явление объясняется переотложением осадочных пород в пространство между разрушенным скальным массивом внутри канала обрушения. Мощность осадочных пород – постоянная величина. При очистных работах на глубоких горизонтах, относительная объемная доля перемещенных осадочных пород в общем объеме пород в канале обрушения уменьшается. Соответственно, уменьшается и коэффициент разрыхления первичных воронок обрушения.

Для определения коэффициента разрыхления обрушенного массива вторичных воронок было произведено измерение объемов воронок с помощью БПЛА (рис. 6). Съемка производилась с помощью устрой-

ства DJI Phantom IV, оснащенного штатной фотокамерой. Обработка результатов съемки осуществлялась в ПО Agisoft photoscan, определение объемов производилось ПО Surpac.

На дату съемки на земной поверхности Соколовского месторождения обнаружены две открытые воронки обрушения. Обе являются вторичными. Результаты обработки измерений (табл. 1) показывают, что при выходе обрушений на земную поверхность через зону обрушения среднее из двух значений коэффициента разрыхления массива 0,99. Разброс значений составляет 0,02, что значительно меньше, чем аналогичный параметр первичных воронок.

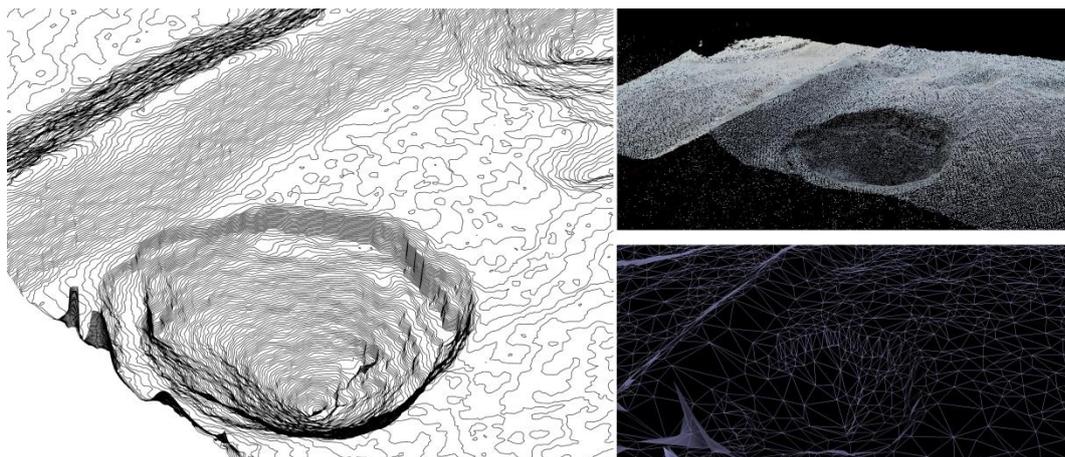


Рис. 6. Пример обработки результатов измерений  
 Fig. 6. Example of processing measurement results

Этому имеются несколько возможных объяснений. Первое – преимущество современной фотограмметрической техники измерений по сравнению с теодолитной и тахеометрической съемкой, второе – малое количество измерений вторичных воронок, третье – особенности процесса обрушения при развитии первичных воронок, а именно наличие значительных полостей под консольным зависанием окружающего массива, влияющих на продолжительность второй стадии воронкообразования (увеличение размеров

воронки). Иными словами, на дату производства измерений часть первичных воронок еще не достигли третьей стадии, что отражается на определяемом коэффициенте разрыхления.

В силу того, что с момента измерений *первичных воронок* прошло от 3 до 25 лет и к настоящему времени они ликвидированы, установить, какое из перечисленных объяснений является достоверным, возможно в дальнейшем, с накоплением статистики по вновь появляющимся воронкам обрушения.

Таблица. Результаты определения  $K_p$  обрушенного массива вторичных воронок

Table. Results of determining the  $K_p$  for the second glory holes

Линии разрезов (С-Ю) Lines of section	Измеренный объем воронок, куб. м Measured volume of glory hole, m <sup>3</sup>	Очистные единицы Stopes	Объем пустот, на дату съемки куб. м Cavity volume, m <sup>3</sup>	$S_{эф}$ , м <sup>2</sup> $S_{ef}$ , m <sup>2</sup>	Глубина кровли, м Roof depth, m	Объем обрушенного массива, куб. м Caved rock volume, m <sup>3</sup>	$K_p$ Swell factor
34–46	40462,541	Б 46/38, гор. –190/–260	36476	477,4	445	212474,0	0,981
65–49	82630,231	Б 49/53, гор. –190/–260	86527	1132,6	445	504022,9	1,008

При организации наблюдений за процессом воронкообразования для различных условий выхода обрушений на поверхность следует использовать соответствующие значения коэффициентов разрыхления, определенные для конкретных условий на месторождении.

#### Заключение

Таким образом, на основании исследований процесса сдвижения, вызванного подземными горными работами, разработана модель воронкообразования. Анализ натурных измерений воронок обрушения позволил определить значения основных параметров модели. Проведенные исследования систематизируют этапы развития воронок обрушения и на основе численных критериев позволяют определять окончание процесса воронкообразования.

Практическими результатами исследований являются: способ оценки состояния и методика монито-

ринга развития воронок обрушения. Данные методы являются технологичными, за счёт использования современных решений, связанных с развитием фотограмметрии и использования беспилотных летательных аппаратов. Технологичность методов заключается главным образом в невысокой стоимости и относительной легкости развертывания мониторинга силами инженерных служб предприятия и быстрого (в течение часа–двух) получения оценки состояния воронкообразования и принятия решения ответственными лицами.

Полученные результаты исследований позволяют значительно снизить риск провала людей и техники в зону обрушения при организации открытых горных работ на поверхности шахтного поля действующих подземных рудников. Результаты исследования легли в основу нормативных документов при производстве работ на Соколовском месторождении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brady В.Н.Г., Brown Е.Т. Rock mechanics: for underground mining. – Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2007. – 628 p.

2. Empirical investigation and characterization of surface subsidence related to block cave mining / K. Woo, E. Eberhardt, D. Elmo, D. Stead // International Journal of Rock Mechanics and Mining

- Sciences. – 2013. – V. 61. – P. 31–42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2013.01.015> (дата обращения 10.12.2019).
3. Курехин Е.В. Технологические схемы отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 67–82.
  4. Overburden failure and the prevention of water and sand inrush during coal mining under thin bedrock / W. Yang, X. Xia, G. Zhao, Y. Ji, D. Shen // Mining Science and Technology (China). – 2011. – V. 21. – № 5. – P. 733–736.
  5. Шнайдер М.Ф., Вороненко В.К. Совмещение подземных и открытых разработок рудных месторождений. – М.: Недра, 1985. – 132 с.
  6. Геотехнологические аспекты стратегии освоения крупных железорудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, Н.В. Гобов, К.В. Барановский, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин, А.А. Рожков // Проблемы недропользования. – 2014. – № 3. – С. 113–125.
  7. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В. Исследование конструкции и параметров комбинированной системы разработки наклонного месторождения кварца // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 87–99.
  8. Казикаев Д.М. Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
  9. Singh K.B., Dhar B.B. Sinkhole subsidence due to mining // Geotechnical and Geological Engineering. – 1997. – № 4. – С. 327–341.
  10. Majdia A., Hassani F.P., Nasiri M.Y. Prediction of the height of distressed zone above the mined panel roof in long wall coal mining // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 98. – P. 62–72. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.04.005> (дата обращения 10.12.2019).
  11. Palchik V. Influence of physical characteristics of weak rock mass on height of caved zone over abandoned subsurface coal mines // Environmental Geology. – 2002. – V. 42. – № 1. – P. 92–101.
  12. Bieniawski Z.T. Rock mechanics design in mining and tunneling. – Rotterdam: Balkema, 1984. – 272 p.
  13. Анিকেев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. – М.: РУДН, 2017. – 328 с.
  14. Villegas T., Nordlund E., Dahnér-Lindqvist C. Hangingwall surface subsidence at the Kiirunavaara Mine, Sweden // Engineering Geology. – 2011. – V. 121. – № 1–2. – P. 18–27. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.010> (дата обращения 10.12.2019).
  15. Estimate of rock mass stability in surface-borehole mining of high-grade iron ore / A.S. Sammal, S.V. Antsiferov, P.V. Deev, S.V. Sergeev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya. – 2017. – С. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012007
  16. Deev P., Sammal A., Antsiferov S. Evaluation of mine support stress state on base of convergence measurement data // Conference Proceedings. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management: SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. – Albena, 2017. – P. 321–326.
  17. Ground collapses related to abandoned underground workings at Waihi, New Zealand / R.L. Brathwaite, C.M. Mazengarb, L. Richards, R.D. Beetham // Conference. – Auckland, New Zealand: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2002. – V. 6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/285288502\\_Ground\\_collapses\\_related\\_to\\_abandoned\\_underground\\_workings\\_at\\_Waihi\\_New\\_Zealand](https://www.researchgate.net/publication/285288502_Ground_collapses_related_to_abandoned_underground_workings_at_Waihi_New_Zealand) (дата обращения 10.12.2019).
  18. Gilbride L.J., Free K.S., Kehrman R. Modeling block cave subsidence at the Molycorp, Inc., Questa Mine – a case study // The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS): Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions. – Anchorage, Alaska, June 25–29, 2005. URL: <http://www.agapito.com/wp-content/uploads/2011/01/Modeling-Block-Cave-Subsidence-at-the-Molycorp-Inc-Questa-Mine-A-Case-Study.pdf> (дата обращения 10.12.2019).
  19. Investigation of swell factor in the block cave draw column / G.S. Esterhuizen, L. Rachmad, A.V. Potapov, L.K. Nordell // Investigation MassMin 2004 Proceedings. – Santiago, Chile, 22–25 August 2004. – P. 215–219.
  20. Palchik V. Bulking factors and extents of caved zones in weathered overburden of shallow abandoned underground workings // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – V. 79. – P. 227–240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2015.07.005> (дата обращения 10.12.2019).
  21. Chandler J. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research // Earth Surface Processes and Landforms. – 1999. URL: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199901\)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199901)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H) (дата обращения 10.12.2019).
  22. Lucieer A., De Jong S.M., Turner D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography // Progress in Physical Geography. – 2014. – V. 38. – № 1. – P. 97–116. URL: <https://doi.org/10.1177/0309133313515293> (дата обращения 10.12.2019).
  23. Dubbini M., Curzio L.I., Campedelli A. Digital elevation models from unmanned aerial vehicle surveys for archaeological interpretation of terrain anomalies: case study of the Roman castrum of Burnum (Croatia) // Journal of Archaeological Science: Reports. – 2016. – V. 8. – P. 121–134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.05.054> (дата обращения 10.12.2019).
  24. Valkaniotis S., Papathanassiou G., Ganas A. Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery: case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece // Engineering Geology. – 2018. – V. 245. – P. 141–152. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.010> (дата обращения 10.12.2019).
  25. Ефремов Е.Ю. Обоснование критерия завершения процесса воронкообразования // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2018. – № 4. – С. 12–22.

Поступила 16.12.2019 г.

#### Информация об авторах

**Ефремов Е.Ю.**, научный сотрудник Института горного дела УрО РАН.

**Дорохов Д.В.**, студент Карагандинского государственного технического университета.

UDC 622.834

## DETERMINATION OF THE SURFACE COLLAPSE PROCESS PHASE CAUSED BY BLOCK CAVING MINING

**Evgeniy Yu. Efreinov<sup>1</sup>,**  
Efreinov-eu@mail.ru

**Dmitriy V. Dorokhov<sup>2</sup>,**  
niz36@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
58, Mamin-Sibiriyak street, Ekaterinburg, 620219, Russia.

<sup>2</sup> Karaganda State Technical University of the First President of the Republic of Kazakhstan,  
56, Mira boulevard, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan.

**The relevance of the research.** Waste rock dumping in the area of the surface collapse caused by the underground mining is one of the rational methods of dumping. It contributes to saving land resources and reducing the transport path of overburden. The paper considers the safety of waste rock dumping on the earth's surface in the collapse zone caused by operating underground mines.

**The aim** of the research is to develop the methods for determining and monitoring the phase of glory hole evaluation for safety of people and equipment when working in the zone of collapse.

**Methods:** creating the caved rock zone model. Model sets the ratio between the glory hole volume and undercut volume using the swell factor. The criterion of the glory hole growth is the increase of the glory hole to the maximum volume, defined by the geometric parameters of the undercut. The swell factor of caved rock mass is determined in situ by analyzing the measured glory holes.

**Results.** The authors have developed the classification of the glory hole evaluation stages and methods for its determining and defined the value of the swell factor of caved rock mass in the specific conditions of the Sokolovskoe ore deposit. The swell factor of the caved rock mass, defined for the first glory holes, is within 1–1.4. It was determined by proportion soil and rock in the waste rock above undercut. The swell factor of the caved rock mass, defined for the second glory holes, is about 1,0

### Key words:

Glory hole, swell factor, caved rock zone, block caving, surface collapse, deformation monitoring, unmanned aerial vehicle, digital elevation model.

### REFERENCES

- Brady B.H.G., Brown E.T. *Rock Mechanics: For Underground Mining*. Dordrecht, Springer Science & Business Media, 2007. 628 p.
- Woo K., Eberhardt E., Elmo D., Stead D. Empirical investigation and characterization of surface subsidence related to block cave mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, vol. 61, pp. 31–42. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2013.01.015> (accessed 10 December 2019).
- Kurehin E.V. Flow diagrams of overburden dumping in borrow excavation of the adjacent area. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 67–82. In Rus.
- Yang W., Xia X., Zhao G., Ji Y., Shen D. Overburden failure and the prevention of water and sand inrush during coal mining under thin bedrock. *Mining Science and Technology (China)*, 2011, vol. 21, no. 5, pp. 733–736.
- Snaider M.F., Voronenko V.K. *Sovmeshchenie podzemnikh i otkrytykh gornykh razrabotok* [The combination of underground and open pit mining]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 132 p.
- Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Y.G., Gobov N.V., Baranovskiy K.V., Nikitin I.V., Solomein Y.M., Rozhkov A.A. Geotechnological aspects of large iron ore deposits development strategy. *Problems of mining*, 2014, no. 3, pp. 113–125. In Rus.
- Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Y.G., Baranovskiy K.V. Investigation of construction and parameters of the combined system for developing quartz slope deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 87–99. In Rus.
- Kazikaev D.M. *Geomekhanicheskie protsessy pri sovmestnoy i povtornoj podrabotke* [Geomechanical processes during combined and second mining]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 288 p.
- Singh K.B., Dhar B.B. Sinkhole subsidence due to mining. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1997, no. 4, pp. 327–341.
- Majdia A., Hassani F.P., Nasiri M.Y. Prediction of the height of distressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 98, pp. 62–72. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.04.005> (accessed 10 December 2019).
- Palchik V. Influence of physical characteristics of weak rock mass on height of caved zone over abandoned subsurface coal mines. *Environmental Geology*, 2002, vol. 42, no. 1, pp. 92–101.
- Bieniawski Z.T. *Rock mechanics design in mining and tunneling*. Rotterdam, Balkema, 1984. 272 p.
- Anikeev A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Sinkholes in the karst areas: formation mechanisms, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017. 328 p.
- Villegas T., Nordlund E., Dahner-Lindqvist C. Hangingwall surface subsidence at the Kiirunavaara Mine, Sweden. *Engineering Geology*, 2011, vol. 121, no. 1–2, pp. 18–27. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.010> (accessed 10 December 2019).
- Sammal A.S., Antsiferov S.V., Deev P.V., Sergeev S.V. Estimate of rock mass stability in surface-borehole mining of high-grade iron ore. *All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85<sup>th</sup> Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, pp. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012007
- Deev P., Sammal A., Antsiferov S. Evaluation of mine support stress state on base of convergence measurement data. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management: Conference Proceedings SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining*. Albena, 2017. pp. 321–326.
- Brathwaite R.L., Mazengarb C.M., Richards L., Beetham R.D. Ground collapses related to abandoned underground workings at Waihi, New Zealand. *Conference. Auckland, New Zealand, Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 2002. Vol. 6. Available

- ble at: [https://www.researchgate.net/publication/285288502\\_Ground\\_collapses\\_related\\_to\\_abandoned\\_underground\\_workings\\_at\\_Waihi\\_New\\_Zealand](https://www.researchgate.net/publication/285288502_Ground_collapses_related_to_abandoned_underground_workings_at_Waihi_New_Zealand) (accessed 10 December 2019).
18. Gilbride L.J., Free K.S., Kehrman R. Modeling block cave subsidence at the Molycorp, Inc., Questa Mine – a case study. *The 40<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS): Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions*. Anchorage, Alaska, June 25–29, 2005. Available at: <http://www.agapito.com/wp-content/uploads/2011/01/Modeling-Block-Cave-Subsidence-at-the-Molycorp-Inc-Questa-Mine-A-Case-Study.pdf> (accessed 10 December 2019).
  19. Esterhuizen G.S., Rachmad L., Potapov A.V., Nordell L.K. Investigation of swell factor in the block cave draw column. *Investigation MassMin 2004 Proceedings*. Santiago, Chile 22–25 August 2004. pp. 215–219.
  20. Palchik V. Bulking factors and extents of caved zones in weathered overburden of shallow abandoned underground workings. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, vol. 79, pp. 227–240. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.07.005> (accessed 10 December 2019).
  21. Chandler J. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999. Available at: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199901\)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199901)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H) (accessed 10 December 2019).
  22. Lucieer A., De Jong S.M., Turner D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 2014, vol. 38, no. 1. pp. 97–116. Available at: <https://doi.org/10.1177/0309133313515293> (accessed 10 December 2019).
  23. Dubbini M., Curzio L.L., Campedelli A. Digital elevation models from unmanned aerial vehicle surveys for archaeological interpretation of terrain anomalies: case study of the Roman castrum of Burnum (Croatia). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, vol. 8, pp. 121–134. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.05.054> (accessed 10 December 2019).
  24. Valkaniotis S., Papathanassiou G., Ganas A. Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery; case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece. *Engineering Geology*, 2018 vol. 245, pp. 141–152. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.010> (accessed 10 December 2019).
  25. Efremov E.Y. Obosnovanie criteria zavershenia protsessy voronkoobrazovaniya [Rationale of cave-in process consummation criterion]. *Izvestia Tl'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, 2018, no. 4, pp. 12–22.

Received: 16 December 2019.

#### Information about the authors

**Evgeniy Yu. Efremov**, researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Dmitriy V. Dorokhov**, student, Karaganda State Technical University of the First President of the Republic of Kazakhstan.

УДК 622.012:338.3

## ПРИНЦИПЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПЕРЕХОДНЫЕ ПЕРИОДЫ

Бурмистров Константин Владимирович<sup>1</sup>,  
k.burmistrov@magtu.ru

Осинцев Никита Анатольевич<sup>1</sup>,  
osintsev@magtu.ru

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

**Актуальность исследования.** *Функционирование горнодобывающих предприятий в современных условиях характеризуется активным воздействием факторов внешней и внутренней среды. В условиях нестабильной внешней среды, при переходе от одного этапа разработки к другому, подсистемы горнодобывающих предприятий должны подчиняться цели обеспечения устойчивого функционирования предприятия – обеспечению выходных потоков с заданными параметрами. В этот период изменяется устойчивость горнотехнической системы, что оказывает влияние на состояние экономической и социальной подсистем горнодобывающих предприятий, а также на состояние окружающей среды, вызванное изменениями в параметрах технологии и технологических процессах. Это требует разработки новых подходов и принципов управления работой горнодобывающих предприятий, основанных на согласовании экономических целей с целями в области экологии и социального развития.*

**Цель:** *разработка концепции устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды разработки месторождений на основе систематизации существующих принципов устойчивого развития в горнодобывающей отрасли.*

**Объекты:** *горнодобывающее предприятие, горнотехническая система, система вскрытия карьера.*

**Методы:** *обзор научной литературы, структурно функциональный анализ, системный анализ.*

**Результаты.** *Обоснована ключевая роль системы вскрытия в структуре горнотехнической системы для обеспечения целей устойчивого развития горнодобывающих предприятий. Выполнена систематизация принципов устойчивого функционирования и развития горнодобывающих предприятий и его систем с выделением четырех групп принципов: общесистемные принципы управления, принципы развития горнодобывающих предприятий, принципы развития горнотехнической системы, принципы развития подсистем горнотехнической системы. В основу предлагаемой системы принципов положена идея последовательного преобразования подсистем горнотехнической системы на всех этапах проектирования и эксплуатации, учитывающая экономические, социальные и экологические аспекты с целью обеспечения заданных параметров функционирования горнодобывающих предприятий. Предложена концепция устойчивого развития горнотехнической системы в переходные периоды разработки. Использование предлагаемого подхода в период перехода от открытых горных работ к открыто-подземному способу разработки позволяет улучшить экономические, экологические и социальные показатели функционирования систем горнодобывающих предприятий.*

### Ключевые слова:

*Принципы, горнодобывающее предприятие, горнотехническая система, система вскрытия, устойчивое функционирование, устойчивое развитие, переходный период, карьерный транспорт.*

### Введение

Горнодобывающие предприятия (ГДП) функционируют в условиях постоянно изменяющейся внешней среды. Так, цены на некоторые виды твердых полезных ископаемых за последние 6–8 лет изменились в 2–10 раз, при этом спрос на данный вид ресурсов возрос в 1,5–2 раза [1–3]. Для обеспечения возрастающей потребности в добываемом сырье, при ухудшающихся горнотехнических условиях разработки, возрастает глубина ведения горных работ, изменяется интенсивность разработки месторождений, пересматриваются текущие параметры карьеров. При приближении контуров карьера к границам очередного этапа разработки возникает необходимость принятия решения о целесообразности дальнейшего ведения горных работ на месторождении.

В настоящее время освоение запасов рудных месторождений открытым способом ведется глубокими карьерами с текущей глубиной 250–400 м и более, проектные глубины карьеров достигают 600–800 м и более [4, 5]. Экономическая эффективность разработ-

ки месторождений на таких глубинах, помимо рыночной цены на добываемое сырье, во многом определяется капитальными и эксплуатационными затратами. С увеличением глубины разработки все большую долю затрат составляют затраты на транспортирование горной массы, достигающие 60–70 % от общих затрат на разработку [6–8], также растет доля объемов горных работ на создание схемы вскрытия, достигающих 30–50 % от общего объема вынимаемой горной массы из карьера, и оснащения ее транспортными средствами [9].

Запасы месторождений, разрабатываемых глубокими карьерами, могут отрабатываться в течение нескольких десятилетий. При этом информация об объемах, качестве и условиях залегания данных запасов поступает поэтапно, по мере отработки месторождения и поступления данных эксплуатационной разведки. В соответствии с этим пересматриваются параметры карьеров и изменяется схема вскрытия. Поэтапное создание и развитие схемы вскрытия объединяет понятие «система вскрытия карьера» (рис. 1) [10, 11].



**Рис. 1.** Система вскрытия при поэтапной разработке глубоких карьеров

**Fig. 1.** Opening-up system of opencast in the development periods of deep pits

Переход от одной схемы вскрытия к другой происходит в течение определенного промежутка времени, который может составлять более 10 лет [12]. В указанные периоды осуществляется преобразование горнотехнической системы, которое характеризуется изменением параметров и показателей ее функционирования: увеличивается проектная глубина и контуры карьеров, проходятся новые вскрывающие выработки, вводится в эксплуатацию новое оборудование, изменяется производительность по полезному ископаемому и вскрышным породам и т. д. В период перехода от одних параметров и показателей функционирования горнотехнической системы (ГТС) и ее подсистем к другим может снижаться производительность горнодобывающего предприятия, вплоть до временного прекращения добычи, возможна остановка функционирования некоторых технологических комплексов и т. п. Перечисленные факторы снижают устойчивость ГТС и не позволяют функционировать с заданными проектными показателями в течение нового этапа, обеспечивая достижение экономических, экологических и социальных целей горнодобывающего предприятия. Поэтому обеспечение устойчивого функционирования и развития ГТС в переходные периоды является актуальной научно-практической задачей.

#### Литературный обзор

Теоретические основы функционирования горнотехнических систем в переходные периоды

В настоящее время под ГТС понимается совокупность горных конструкций и технологических подсистем во взаимодействии с вмещающими их участками недр [13]. Существующие подходы и направления научных исследований по-разному рассматривают структуру ГТС и, соответственно, выделяют в ней определенные подсистемы и элементы. В исследования [14] ГТС рассматривается как совокупность технической, технологической и организационной систем. По мнению автора, это позволяет определять рациональную структуру резервов в горнотехнической системе. Подход, предложенный в [15], рассматривает ГТС тождественно понятию «горнодобывающее предприятие» (шахта) и определяет её как совокупность методов отработки угольного пласта в конкретных горно-геологических условиях, при определенной композиции и взаимосвязи элементов процесса угледобычи (основных подсистем). Такое рассмот-

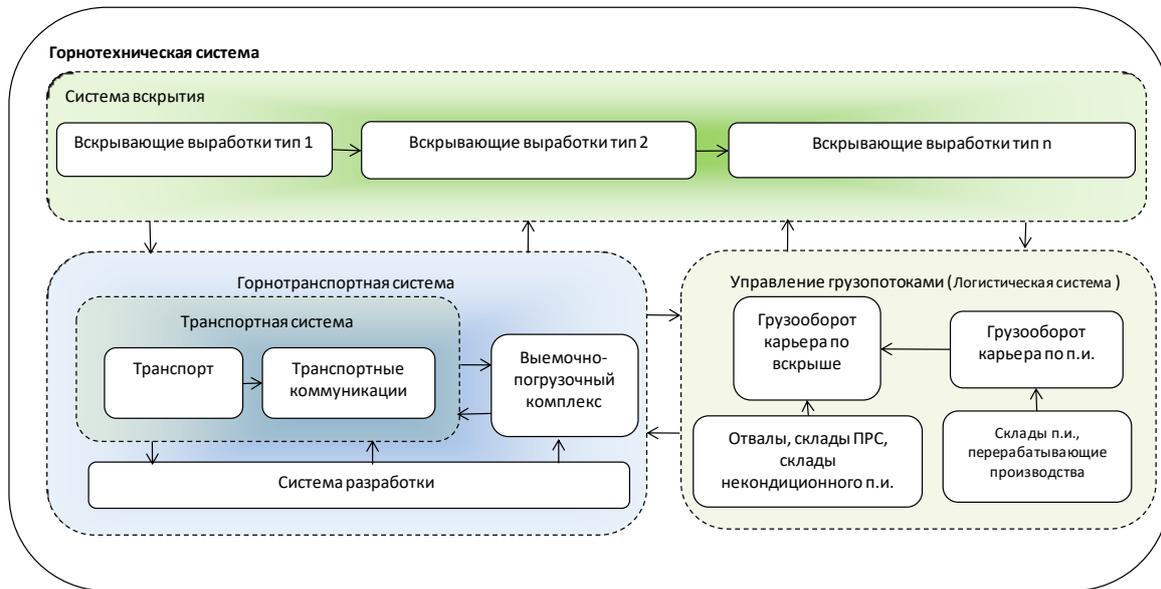
рение позволяет оптимизировать параметры подсистем и минимизировать затраты ресурсов. В работе [16] ГТС рассматривается применительно к комбинированной геотехнологии и разделяется по количеству формируемых ярусов (открытый, открыто-подземный, подземный). Такой подход позволяет учитывать особенности технологии производства горных работ в каждом ярусе и, что особенно важно, сочетаемость данных работ и процессов в рамках освоения одного месторождения. При рассмотрении ГТС как системы, в составе которой наиболее ресурсоемкими элементами являются вскрытие и транспортирование горной массы, в ее структуре можно выделить следующие подсистемы (системы): система вскрытия [10, 11, 17], система разработки [10, 11], транспортная система [18], горнотранспортная система [19], логистическая система (управление грузопотоками) [20] (рис. 2). Понятие «система вскрытия» было дано академиком В.В. Ржевским [11] и получило развитие в трудах академика К.Н. Трубецкого [10, 17]. В предлагаемых им формулировках оно тождественно определению «генеральная схема вскрытия», смысл которого продемонстрирован на рис. 1. Однако, как показывает анализ [21], понятие «система вскрытия» редко используется в практике проектирования и выполнения научных исследований, так как вопросы вскрытия и карьерного транспорта рассматриваются в составе разных систем. Например, выбор и обоснование вскрытия производится в рамках понятия «схема вскрытия», предложенного академиком В.В. Ржевским, вопросы карьерного транспорта рассматриваются в составе транспортной системы, предложенной членом-корреспондентом РАН В.Л. Яковлевым, связь карьерного транспорта с системой разработки в составе горнотранспортной системы предложено профессором А.Ю. Дриженко.

Схема вскрытия в карьере формируется под определенные транспортные средства, которые могут отличаться на различных этапах разработки месторождения [20]. При этом в классификационных признаках системы разработки виды и параметры карьерного транспорта не учитываются.

Авторами настоящей статьи предлагается объединить карьерный транспорт, транспортные коммуникации и конструкции, а также вскрывающие выработки в составе системы вскрытия. Это позволит комплексно решать задачи оптимизации транспорта и схемы вскрытия в составе наиболее затратных подси-

стем ГТС [21–23]. От своевременности и правильности принятия решений по оптимизации системы вскрытия будут зависеть технико-экономические по-

казатели последующих этапов разработки месторождения, продолжительность периода перехода от одного этапа разработки к другому.



**Рис. 2.** Схема структуры горнотехнической системы: ПРС – почвенно-растительный слой; п.и. – полезное ископаемое  
**Fig. 2.** Scheme of the mining and technical systems structure: PPS – top soil; n.u. – mineral products

В различного рода системах переходный период – это переход системы из одного состояния в другое [24, 25]. Чтобы понимать характер и уровень произошедших в системе изменений необходимо задаваться условием, что до переходного периода система находилась в одном устойчивом состоянии, а после переходного периода она перешла в новое устойчивое состояние.

Применительно к геотехнологии чл.-корр. РАН В.Л. Яковлев в работе [26] дает определение переходного периода, под которым понимается время перехода предприятия с одного порядка и способа отработки месторождения на другой (время осуществления переходного процесса). Под порядком отработки месторождения понимается стабильная во времени последовательность освоения минерального объекта по определенной технологии и с использованием определенного комплекса горнотранспортного оборудования, т. е. это устойчиво функционирующая ГТС с заданными параметрами и показателями. При этом чаще всего переходный период применяется для условий перехода от открытого к подземному способу разработки [27, 28]. В то же время преобразования ГТС, связанные с переходом с одного этапа разработки открытым способом на другой, также существенно влияют на устойчивость систем и поэтому должны выделяться в переходный период.

В условиях нестабильной внешней среды, при переходе от одного этапа разработки к другому, подсистемы ГДП должны подчиняться цели обеспечения устойчивого функционирования предприятия – обеспечению выходных потоков с заданными параметрами. В этот период изменяется устойчивость ГТС, что

оказывает влияние на состояние экономической, социальной подсистем ГДП (рост издержек, возможная социальная напряженность на предприятии), а также на состояние окружающей среды, вызванное изменениями в параметрах технологии и технологических процессах (увеличиваются выбросы вредных веществ из-за применения более дешевых, но менее качественных материалов и оборудования, формируются участки отвалов, выгодные с экономической точки зрения в связи с сокращением расстояния транспортирования, но ухудшающие экологическую обстановку на карьере и прилегающей территории и т. п.). Это требует разработки новых подходов и принципов управления работой ГДП и его подсистем, основанных на согласовании экономических целей с целями в области экологии и социального развития.

Основными внешними факторами, являющимися причинами возникновения переходных периодов, являются: текущий спрос на продукцию горнодобывающего предприятия и перспектива спроса; текущая цена на добываемое сырье и прогнозируемое изменение цен. К внутренним факторам относят [21]: обеспеченность сырьевыми ресурсами, в том числе уточнение запасов полезного ископаемого по результатам эксплуатационной разведки; технический прогресс, позволяющий применять новые виды и типы горнотранспортного оборудования; возможность вовлечения в отработку новых участков месторождения. Оценка перечисленных факторов в управлении ГДП позволяет разработать стратегию функционирования предприятия в переходный период, обеспечить устойчивое функционирование и устойчивое развитие на следующих этапах разработки месторождений.

#### Устойчивость горнотехнической системы в переходные периоды

Переходные процессы, происходящие в ГТС, приводят к изменению параметров и показателей ее функционирования, а также функционирования ее подсистем. Изменение системы вскрытия меняет технологические (расстояние транспортирования, объемы вскрышных работ и т. д.), экономические (капитальные и эксплуатационные затраты) показатели, влияет на состояние окружающей среды (выбросы вредных веществ, размещение вскрышных пород и т. д.). Поскольку данные параметры и показатели задаются проектами и должны соответствовать регламентам и нормам, недопустимо чтобы внешние и внутренние изменения, происходящие в ГТС, приводили к отклонению от заданных параметров и показателей и тем самым снижали устойчивость ГТС.

В литературе понятие «устойчивость» встречается применительно к различным системам – техническим, экономическим, социальным, инновационным, экологическим и др. Применительно к техническим системам различные авторы понятие «устойчивость» рассматривают как: способность системы сохранять текущее состояние при наличии внешних воздействий [29], способность системы, возвращаться в исходное состояние после внешних воздействий и продолжать работу без изменения функциональных характеристик [30]. В работе [31] устойчивость горного объекта рассматривают как способность функционировать с заданными параметрами в определённых условиях в течение требуемого отрезка времени. Авторами [32–39] выполнен обзорный анализ принципов и механизмов устойчивого развития горно-металлургических холдингов, транспортных и логистических систем. В [32] отмечается, что множество трактовок устойчивого развития связано с попытками исследователей обобщить понимание устойчивости как способности системы к адаптации в условиях внешних и внутренних воздействий на систему и применить ко всем возможным вариантам развития частные случаи определения, основываясь на конкретных моделях и примерах. В исследованиях [40] авторы выделяют два подхода к понятию устойчивости деятельности промышленного предприятия – устойчивое развитие и устойчивое функционирование. Понятие «устойчивое развитие» является более распространенным, в настоящее время насчитываются десятки различных определений применительно к различным системам. Некоторые исследователи [40] объединяют данные понятия, говоря об устойчивом функционировании и развитии предприятий.

Большинство существующих формулировок понятия «устойчивое развитие» соответствует определению, изложенному в Концепции устойчивого развития в Программе «Повестка дня на XXI столетие» [41], и предполагает функционирование экономической системы на благо социума без нарушения окружающей экологической среды, в результате чего существующие в мире ресурсы должны быть сохранены для будущих поколений. Применительно к ГДП это

означает проектирование и планирование горных работ на месторождении для достижения разумного баланса между экономическим, социальным, экологическим развитием предприятия и потребностями потребителей сырья. В соответствии с Программой [41], различные государства мира [42], регионы [43, 44] и предприятия начали активно разрабатывать стратегии по приведению своей экономической деятельности к принципам устойчивого развития. Многие крупные горнодобывающие компании и холдинги, например Русская медная компания, Норильский никель и другие, разрабатывают собственные программы устойчивого развития.

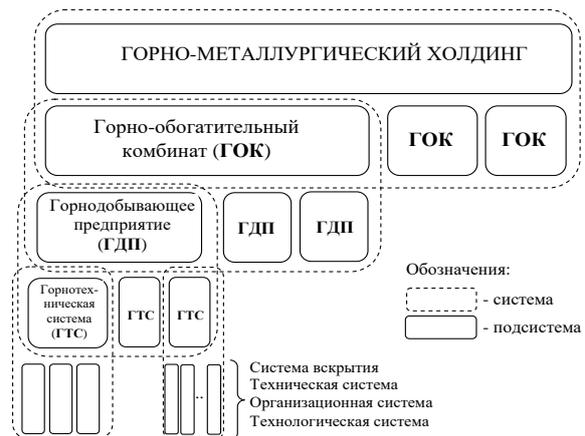


Рис. 3. Схема иерархической структуры крупных горнодобывающих компаний

Fig. 3. Scheme of the hierarchical structure of large mining companies

На уровне компаний концепция устойчивого развития рассматривается как «Концепция тройного критерия» (Triple Bottom Line), согласно которой в корпоративном процессе принятия решений учитываются не только финансовые показатели, но также социальные и экологические результаты деятельности компании [45]. В зарубежных исследованиях активно развиваются подходы, основанные на использовании понятий «зелёная» добыча (green mining) [46–48] и геометаллургия (geometallurgy) [49, 50], доказано, что их реализация в значительной степени будет определять развитие горнодобывающей промышленности в будущем. В соответствии с данными теориями горнодобывающим компаниям необходимо ориентироваться не на получение прибыли в краткосрочной перспективе, а на успех в бизнесе и экологическое выживание в долгосрочном периоде, что требует изменения финансовых показателей и расходов в краткосрочной перспективе. Такой подход должен быть ориентирован для всех уровней управления предприятий, входящих в структуру минерально-сырьевого комплекса страны (рис. 3).

Выполненный авторами анализ показал, что в настоящее время в современной научной литературе отсутствуют чётко сформулированные принципы устойчивого развития для горнодобывающей отрасли, реализация которых позволила достигать целей

устойчивого развития, установленных в [51]. Выявленные в результате анализа существующие принципы проектирования и развития систем в горнодобывающей отрасли предлагается поделить на следующие группы:

- общесистемные принципы, которые характерны для систем всех уровней от горно-металлургического холдинга до подсистем ГТС [52] (рис. 3);
- принципы, направленные на развитие ГДП, – принципы развития [53, 54], принципы управления качеством [55], принципы устойчивого развития геотехнологий [53, 56], методические принципы планирования работ [57–60], принципы экологического контроля рисков территорий [61], принципы функционирования и развития структурных подразделений [53], принципы проектирования [14, 56, 62–64], принципы проектирования развития предприятия [65], принцип повторного использования пространства и техногенного сырья [66–68], принципы системного потока [69], принципы геометаллургии [49–51], принципы экономической, экологической и социально-культурной устойчивости [52, 70–79];
- принципы, направленные на развитие ГТС, – группа принципов, направленная на развитие ка-

рьера или шахты как самостоятельной единицы – принципы комплексного освоения [80], принципы полного цикла освоения месторождения [63], принципы организации ГТС [15, 81]; принципы проектирования ГТС [82], принципы обеспечения устойчивости объектов [66, 83–85], принцип управления [86, 87];

- принципы, направленные на развитие подсистем ГТС, в частности системы вскрытия, т. е. это группа принципов, ориентированная на развитие отдельных систем, составляющих ГТС, – принципы формирования технологических схем [88, 89], принципы формирования грузопотоков [11, 18], принцип формирования схемы вскрытия [10], принципы эксплуатации транспорта [8, 90, 91], принцип замещения дизельных видов электрическим [92].

Выполненный анализ существующих принципов показал, что в настоящее время отсутствует универсальная система принципов устойчивого развития ГТС и ее подсистем, а большинство известных принципов направлены на системы более высокого уровня: горнодобывающее предприятие и выше – 49 %, горнотехническая система – 38 % и подсистемы ГТС – 13 % (табл. 1).

**Таблица 1.** Распределение числа принципов развития систем в горной отрасли

**Table 1.** Distribution of the principles for development of systems in the mining industry

Основные принципы обеспечения устойчивого развития ГДП Basic principles of sustainable development for the MO	Принципы проектирования и развития Design and development principles		
	Система вскрытия Opening-up of an opencast system	Горнотехническая система Mining and technical systems	Горнодобывающее предприятие Mining operations
Технические/Technical	2	8	2
Технологические/Technological	6	13	13
Организационные/Organizational	5	10	15
Экономические/Economic	1	4	11
Экологические/Ecological	1	6	10
Социальные/Social	1	3	7

В процессе группировки было установлено, что наблюдается дисбаланс принципов в сторону достижения организационных и технологических целей на уровне ГТС и ГДП в целом. Отсутствие «социальных» и недостаточное количество «экологических» принципов на уровне системы вскрытия не позволяет обеспечить экологическую и социальную устойчивость данной системы и, как следствие, снижает общую устойчивость ГТС и ГДП.

Таким образом, анализ функционирования ГТС в переходные периоды позволяет сделать следующие выводы: отсутствует комплексный подход к реализации принципов устойчивого развития в горнодобывающей отрасли. Существующие принципы проектирования и развития систем ориентированы в первую очередь на управление горнодобывающим предприятием и слабо учитывают особенности проектирования

и функционирования ГТС и ее подсистем. Такой подход не позволяет устойчиво развиваться ГТС и ГДП в целом.

#### Система принципов устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды

Структура и функции горнотехнической системы

В понимании авторов настоящей статьи, горнотехническая система рассматривается как совокупность технической, технологической организационной, экономической, социальной, экологической подсистем, а также системы вскрытия, обеспечивающих ее устойчивое функционирование и развитие на всех этапах разработки месторождения.

Одной из основных задач, объединяющих все подсистемы, является эффективная работа с информаци-

онными (анализ конъюнктуры сырьевых рынков), финансовыми (стоимость ресурсов и т. п.) и материально-техническими потоками (оборудование, материалы и т. п.), поступающими из внешней среды на ГДП, а также потоками, поступающими из ГДП во внешнюю среду (товарная продукция в заданном объёме и требуемого качества, различного рода отчисления, техногенные объекты и выбросы в окружающую среду и т. п.). Основной системой в структуре ГТС, объединяющей техническую, технологическую и организационную подсистемы, является система вскрытия. Данные подсистемы являются внутренними для ГТС. Экологическая, экономическая и социальная

системы рассматриваются и как внешние и как внутренние для ГТС, внутри ГТС они выполняют определенные функции, присущие ГТС, а вне – функции, характерные для среды функционирования горнодобывающего предприятия (рис. 4). Основной функцией внутренних подсистем является обеспечение устойчивости функционирования ГТС, а взаимодействие внутренних и внешних подсистем направлено на обеспечение устойчивого развития ГТС.

Основные параметры, используемые для оценки устойчивости функционирования и развития ГТС в соответствии с экономическими, экологическими и социальными целями, представлены в табл. 2.

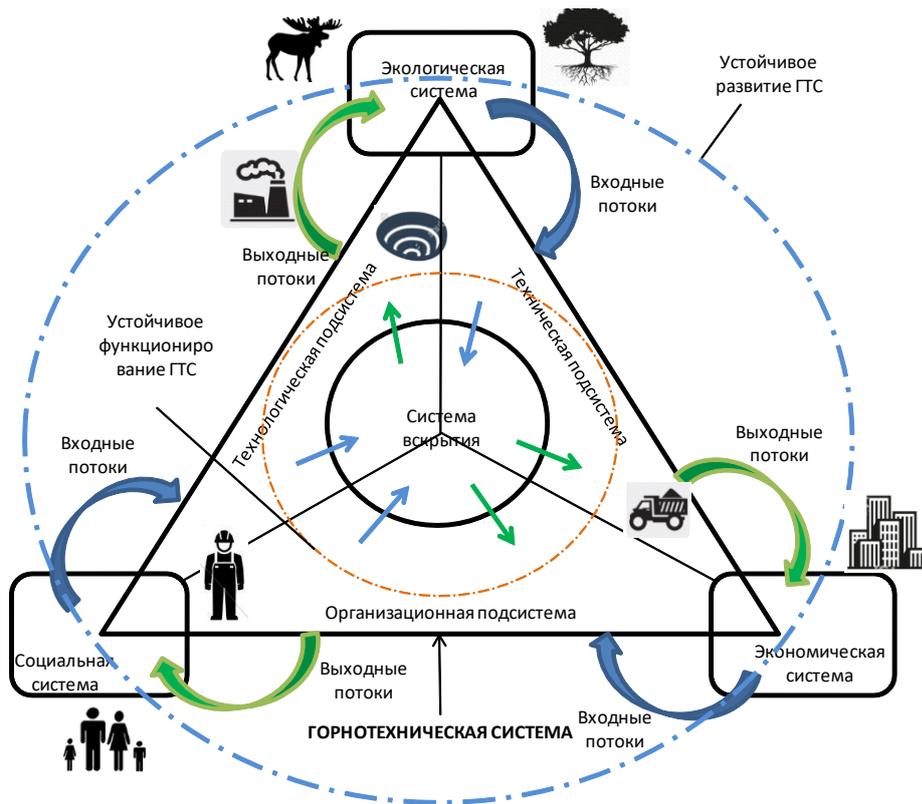


Рис. 4. Схема устойчивого функционирования и развития ГТС

Fig. 4. Scheme of sustainable functioning and development of MTS

Таблица 2. Основные параметры среды функционирования ГТС

Table 2. Main parameters of the MTS functioning

Системы среды функционирования ГТС Systems of MTS functioning	Параметры среды функционирования ГТС Parameters of the MTS functioning	
	Внутренние Internal	Внешние External
Экономическая Economic	Доходы горнодобывающего предприятия Mining revenues	Доходы бюджетов различных уровней Budgets revenues of various levels
Экологическая Ecological	Объемы выбросов вредных веществ как фактор загрязнения атмосферы карьера, препятствующий нормальному функционированию ГТС Emissions of harmful substances as a factor of open pit atmosphere pollution impeding the MTS normal functioning	Объемы выбросов вредных веществ, нарушение территорий как фактор, препятствующий нормальному проживанию и развитию населенных пунктов, регионов Emissions of harmful substances, violation of the territories as a factor impeding the normal residence and development of human settlements, the regions
Социальная Social	Условия работы персонала предприятия Working conditions of the enterprise staff	Условия проживания жителей близ лежащих населенных пунктов Living conditions of residents near the settlements

Предлагаемый подход предусматривает декомпозицию ГТС как совокупности более мелких подсистем, взаимодействующих друг с другом, при этом функционирование каждой подсистемы должно подчиняться целям устойчивого функционирования и развития и основываться на структурированных принципах, как определяющих правилах для каждой системы.

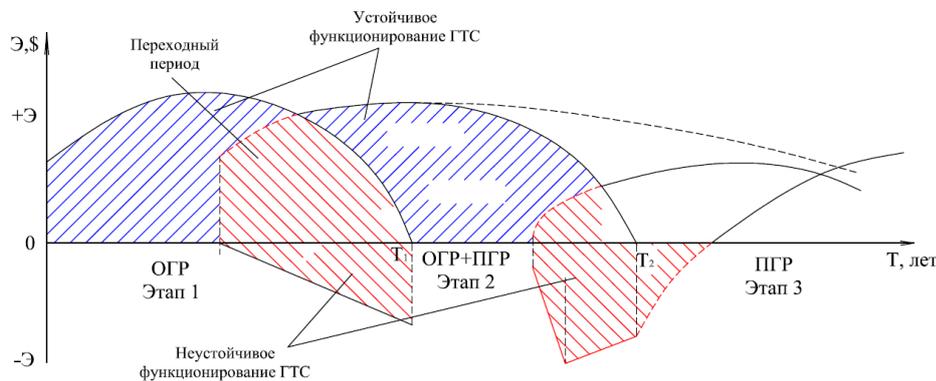
Принципы устойчивого функционирования и развития горнотехнической системы

Авторами настоящей работы предлагается разделять понятия «устойчивое развитие» и «устойчивое функционирование» ГТС с целью обеспечения целей и задач устойчивого развития на всех уровнях управления как внутри ГТС, так и в её взаимодействии с внешней средой.

Под устойчивым функционированием ГТС понимается стабильное во времени функционирование системы с установленными технологическими (производительностью по руде и вскрышным породам) и экономическими проектными показателями после прохождения переходных периодов. Устойчивое функционирование обеспечивается путем оптимизации параметров системы вскрытия, технической, технологической и организационной подсистем ГТС. Устойчивое развитие ГТС расширяет понятие «устойчивое функционирование» и рассматривает

работу ГДП и его систем не только с позиции достижения экономических целей, но с учетом изменений в социальной и экологических системах ГДП в процессе переходного периода, в последующие этапы работы ГДП и на период после завершения добычи полезных ископаемых.

Горнодобывающие предприятия, функционируя в пределах запроектированного этапа разработки, обеспечивают добычу полезного ископаемого в установленных объемах. Рост глубины ведения горных работ приводит к увеличению затрат на разработку, главным образом в системе вскрытия. Поэтому принятие решения о переходе на новый этап разработки может происходить в период снижения общей эффективности разработки месторождения. Как рассматривалось в [21], чем раньше принимается решение о начале переходного периода, тем больше возможных вариантов развития системы вскрытия и горнотехнической системы в целом может быть рассмотрено для обеспечения устойчивого функционирования и развития предприятия. При приближении к окончанию очередного этапа дополнительные затраты и другие осложняющие факторы, которые возникают в переходный период, могут привести к неустойчивому функционированию ГТС, вплоть до остановки функционирования ГДП (рис. 5).



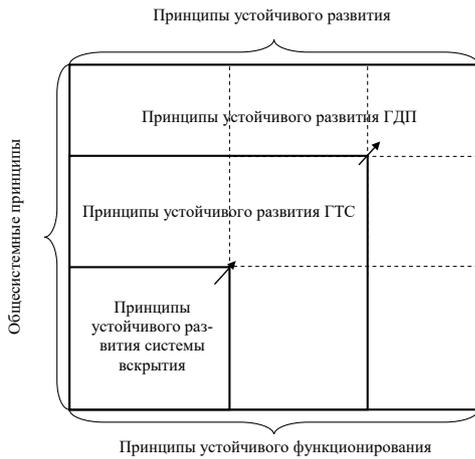
**Рис. 5.** Этапы горных работ и переходные периоды при разработке месторождений:  $T$  – продолжительность разработки месторождения;  $T_1$  и  $T_2$  – сроки окончания отработки первого и второго этапов разработки;  $\mathcal{E}$  – условная экономическая эффективность предприятия; ОГР – открытые горные работы; ПГР – подземные горные работы

**Fig. 5.** Stages of mining and transitional periods in development of deposits:  $T$  – duration of mining in deposits;  $T_1$  and  $T_2$  – deadlines for the first and second stages of development;  $\mathcal{E}$  – economic efficiency of the MO; ОГР – open pit mining; ПГР – underground mining

Обеспечению устойчивого функционирования и развития ГДП должна предшествовать реализация соответствующих принципов устойчивого функционирования и развития ГТС, достижению устойчивого функционирования и развития ГТС предшествует реализация принципов устойчивого развития подсистем ГТС (системы вскрытия и других подсистем) (рис. 6). При этом достижение целей устойчивого развития ГДП осуществляется приведением в соответствие целей всех подсистем нижестоящих уровней управления целями и задачами вышестоящих уровней.

С учетом предложенного подхода существующие принципы были систематизированы по признаку обеспечения устойчивости: общесистемные принципы, принципы обеспечения экономической, экологической и социальной устойчивости (рис. 7).

Использование предлагаемой системы принципов в практической деятельности ГДП позволит эффективно функционировать и устойчиво развиваться ГДП, обеспечить соответствие всех систем и подсистем ГДП целям концепции устойчивого развития и, как следствие, обеспечить достижения экономических, экологических и социальных целей функционирования ГДП.



**Рис. 6.** Схема концепции проектирования и реализации принципов устойчивого функционирования и развития ГТС: ГТС – горнотехническая система; ГДП – горнодобывающее предприятие

**Fig. 6.** Design and implementation scheme of the concept of the sustainable functioning and development principles of MTS: GTS – mining and technical system; GDP – mining operations

#### Результаты

Сложность обеспечения устойчивости функционирования и развития горнотехнических систем возрастает с ростом глубины ведения горных работ.

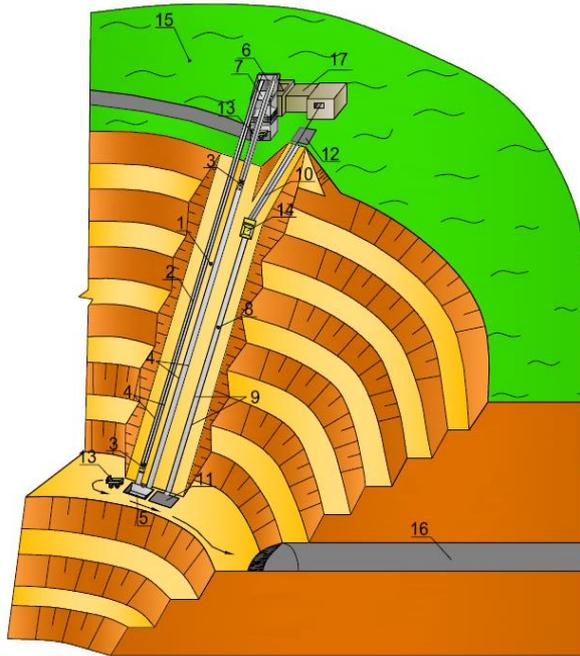
Наиболее сложными являются переходные периоды на заключительные этапы открытой разработки карьеров, когда текущие глубины ведения открытых горных работ могут превышать 500 м, а конечные – приближаются к 1000 м, а также периоды перехода от открытых горных работ к открыто-подземным или подземным. Достижению целей устойчивого функционирования препятствует усложнение горнотехнических условий разработки, не позволяющих обеспечить проектные показатели добычи руды, а целей устойчивого развития – возрастающие объемы выбросов загрязняющих веществ, увеличение объема размещения вскрышных пород при разносе бортов карьера, ухудшение условий работы персонала, рост эксплуатационных затрат на разработку, необходимость крупных инвестиций, особенно при строительстве подземного рудника, сложность обеспечения безопасности горных работ. В таких условиях особую актуальность приобретает разработка технологических решений на уровне подсистем ГТС, направленных на достижение целей устойчивого функционирования и развития горнотехнической системы и горнодобывающего предприятия в целом.

Рассмотрим в качестве примера реализации предлагаемого в работе подхода технологическое решение по изменению системы вскрытия в период перехода от открытого к открыто-подземному способу разработки.



**Рис. 7.** Система принципов устойчивого функционирования и развития ГДП и его систем

**Fig. 7.** System of the sustainable functioning and development principles of the MO and their subsystems



**Рис. 8.** Схема карьерной вскрывающей выработки для подземного рудника: 1 – карьерный подъемник; 2 – тяговая часть подъемника; 3 – транспортируемая горная масса; 4 – трасса подъемника; 5 – погрузочный бункер; 6 – разгрузочная башня; 7 – разгрузочный бункер; 8 – подъемное устройство; 9 – направляющие для шахтного оборудования; 10 – стальной канат подъемного устройства; 11 – площадка приема и подачи оборудования на нерабочем борту карьера; 12 – площадка приема и подачи оборудования на поверхности; 13 – автосамосвал с породой из рудника; 14 – самоходное транспортное оборудование; 15 – поверхность; 16 – подземная выработка

**Fig. 8.** Scheme of opening-up of an open-pit element for underground mining: 1 – open pit lift (skip); 2 – traction part of the lift; 3 – transported rocks; 4 – lift route; 5 – loading batcher; 6 – discharge tower; 7 – discharge pocket; 8 – lifting machine; 9 – mine equipment route; 10 – steel rope lifting machine; 11 – area for reception and supply of equipment on the non-working bench of the pit; 12 – area for receiving and supplying equipment on the surface; 13 – underground dump truck; 14 – mining equipment; 15 – surface; 16 – underground mine

Известно, что использование карьерных подъемников различных видов позволяет повысить эффективность открытого способа разработки месторождений [21, 93, 94]. Целесообразность применения карьерных подъемников для условий открыто-подземной разработки была рассмотрена в [95, 96]. Однако для обслуживания подъемника и подземного рудника необходимо сохранение и поддержание существующей на карьере системы автомобильных съездов. Сформированная схема вскрытия карьера при использовании автотранспорта во многом определяет результирующий угол наклона борта карьера. Увеличение угла наклона дает возможность отработать часть запасов руды ниже дна карьера на период стро-

ительства подземного рудника. Таким образом, переходный период с открытого способа разработки на открыто-подземный проходит без разрыва в добыче руды. Увеличить угол наклона нерабочего борта можно путем отработки транспортных берм и уменьшения их ширины до размеров предохранительных берм. Также это позволит сформировать площадку перегрузочного пункта в карьере. Транспортный доступ и обслуживание подземного рудника и нижних горизонтов карьера будут осуществляться по вновь созданной схеме вскрытия.

На основе предложенного в настоящей статье подхода и сформулированных принципов был разработан проект вскрывающей выработки, которая может быть применена в переходный период на заключительный этап открытого способа разработки месторождения [95]. В переходный период формируется карьерная вскрывающая выработка, которая представляет собой карьерный подъемник, соединенный общим электроприводом с подъемным устройством, обслуживающим подземный рудник. Данное подъемное устройство позволяет производить подъем и спуск оборудования и материалов для подземного рудника без использования автотранспорта и автомобильных карьерных съездов (рис. 8). Перегрузочный пункт, в зависимости от используемого типа подъемника, может размещаться в карьере на глубине 200–400 м и более.

С учетом того, что для рекомендуемых видов переходных периодов характерно значительное сокращение объемов перевозки (до 10 раз и более), данная выработка обеспечит необходимый грузооборот по основным и вспомогательным материалам. Достижимые результаты от предлагаемого решения, а также реализуемые при этом принципы представлены в табл. 3.

Реализация предлагаемого решения по формированию системы вскрытия соответствует целям устойчивого развития, реализуется на основе рассмотренных принципов и позволит значительно улучшить экономическое, экологические и социальные показатели переходных периодов.

#### Заключение

Анализ функционирования предприятий горнодобывающей отрасли позволяет сделать следующие выводы.

Отсутствует комплексный подход к реализации принципов устойчивого развития в горнодобывающей отрасли. Расхождение в применяемой терминологии, отсутствие универсальной общепринятой системы принципов, а также непропорциональное использование принципов для регулирования различных видов деятельности горного предприятия ограничивает эффективное взаимодействие подсистем предприятия между собой и с внешней средой и не позволяет обеспечивать системную реализацию концепции устойчивого развития на всех уровнях управления – от горно-металлургического холдинга до горнотехнической системы.

**Таблица 3.** Реализация принципов устойчивого функционирования и развития ГТС (на примере реализации проекта вскрывающей выработки с использованием карьерных подъемников)

**Table 3.** Implementation of the sustainable functioning and development principles of MTS (on the example of implementation of opening-up project using the opencast element for underground mining)

Цели устойчивого развития ГДП Goal of MO sustainable development	Результаты достижения целей Goal achievement results	Принципы устойчивого развития Sustainable development principles		
		ГДП MO	ГТС MTS	Система вскрытия Opening-up of an opencast system
Экономические Economic	Снижение затрат на транспортирование горной массы до 70 % и сокращение затрат на вскрышные работы от разноса бортов карьера на 25–45 % Reducing the cost of transportation of rock mass up to 70 % and reducing the cost of waste work from the develop of open pit walls by 25–45 %	Принципы устойчивого развития геотехнологий [56]; принцип ресурсосбережения [53]; принцип оптимальности [62] Principles of sustainable development of geotechnology [56]; resource saving principle [53]; optimality principle [62]	Принцип эффективности и безопасности [88] Principle of efficiency and safety [88]	Принципы формирования схемы вскрытия [10], принцип формирования грузопотоков [11] Opening-up of an opencast system principles [10], principle of haulage flows [11]
Экологические Ecological	Сокращение выбросов загрязняющих веществ до 50 %, снижение отходов в среднем на 30 % Reducing pollutant emissions by up to 50 %, reducing waste by an average of 30 %	Принцип минимизации воздействия [53] Minimizing impact principle [53]	Принцип проектирования ГТС [13] Principle of MTS design [13]	Принцип замещения видов транспорта [92] Principle of mining transport changes [92]
Социальные Social	Повышение безопасности работ, улучшение условий труда персонала, повышение уровня автоматизации производства Improving the safety of work, working conditions of staff, increasing the level of production automation	Принцип социальной стабильности [53] Principle of social stability [53]	Принципы обеспечения безопасности [81] Safety principles [81]	Принцип управления оборудованием [87] Equipment control principle [87]

Авторами настоящей работы разработана концепция и систематизированы принципы устойчивого функционирования и развития горнотехнических систем в переходные периоды, обеспечивающие согласование экономических целей подсистем ГТС с целями в области социального развития горнодобывающего предприятия и охраны окружающей среды. Существующие принципы проектирования и развития горного производства систем сгруппированы в соответствии с уровнями управления ГДП и ГТС в четыре группы: общесистемные принципы управления, принципы развития ГДП, принципы развития ГТС, принципы развития подсистем ГТС. Такой подход позволит осуществлять реализацию принципов на всех этапах проектирования и эксплуатации ГДП,

учитывая экономические, социальные и экологические аспекты функционирования ГДП.

Реализация предлагаемого в работе подхода позволила разработать проект вскрывающей выработки с использованием карьерных подъемников различных видов. Соблюдение принципов устойчивого функционирования и развития ГТС на всех уровнях управления горнодобывающим предприятием позволяет снизить затраты на транспортирование горной массы до 70 %, на выполнение вскрышных работ – до 45 %, сократить объемы выбросов загрязняющих веществ до 50 %, а также значительно улучшить условия труда персонала предприятия и повысить безопасность производства работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Katz J., Pietrobelli C. Natural resource based growth, global value chains and domestic capabilities in the mining industry // Resources Policy. – 2018. – V. 58. – P. 11–20.
- Finanz.ru. URL: <http://www.finanz.ru> (дата обращения 11.06.2019).
- The London Metal Exchange. URL: <https://www.lme.com> (дата обращения 11.06.2019).
- Abdollahisharif J., Bakhtavar E., Shahriar K. Open-pit to underground mining – Where is the optimum transition depth? // 21<sup>st</sup> WMC & Expo 2008. – London, 2008. – P. 189–196.
- Решетняк С.П. Перспективы развития открытого способа разработки на основе эффективного применения информационных технологий // Открытые горные работы в XXI веке: Сб. трудов межд. науч.-практ. конф. – Челябинск: ООО НТЦ «Горное дело», 2011. – С. 207–213.
- Paricheh M., Osanloo M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties // 16<sup>th</sup> International Conference on Computer Applications in the Mineral Industries. – Istanbul, Turkey, 5–7 October 2016. – P. 34.
- Czaplicki J.M. Shovel-truck systems. Modelling analysis and calculation. – London: CRC Press, 2009. – 172 p.
- Яковлев В.Л., Бахтурин Ю.А., Журавлев А.Г. Основные аспекты формирования и новые научные направления исследований транспортных систем карьеров // Наука и образование. – 2015. – № 4. – С. 67–72.
- Шпанский О.В. Влияние капитальной схемы вскрытия на конечные контуры карьеров // Горный журнал. – 2002. – № 11–12. – С. 37–42.
- Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В. Проектирование карьеров. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – Т. II. – 535 с.

11. Ржевский В.В. Открытые горные работы. В 2-х ч. Ч. 2. Технология и комплексная механизация. – М.: Недра, 1985. – 549 с.
12. Гибадуллин З.Р., Красавин В.П., Самусенко А.К. Технология разработки месторождений Учалинского ГОКа // Горный журнал. – 2004. – № 6. – С. 25–30.
13. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Принципы проектирования горнотехнических систем комплексного освоения рудных месторождений комбинированной геотехнологией // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. – № 6. – С. 58–66.
14. Соколовский А.В. Методология проектирования технологического развития действующих карьеров: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2009. – 38 с.
15. Ютяев А.В. Комплексное обоснование параметров горнотехнических систем высокопроизводительных угольных шахт: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 129 с.
16. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Проектирование формирования и развития горнотехнических систем при комбинированной геотехнологии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S 1-1. – С. 229–240.
17. Проектирование карьеров / К.Н. Трубецкой, Г.Л. Краснянский, В.В. Хронин, В.С. Коваленко. – М.: Высшая школа, 2009. – 694 с.
18. Яковлев В.Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. – Новосибирск: Сиб. отд-ние: Наука, 1989. – 240 с.
19. Дриженко А.Ю. Развитие теории карьерных горнотранспортных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 6. – С. 134–142.
20. Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Shakhshakpaev A.N. The selection of open-pit dump trucks at the reconstruction of quarry // Procedia Engineering. – 2017. – V. 206. – P. 1696–1702.
21. Бурмистров К.В. Обоснование системы вскрытия в переходные периоды разработки месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – Т. 1. – № 12 (2). – С. 84–94.
22. Обоснование технологических схем транспортирования горной массы с применением карьерных подъемников при разработке месторождений открыто-подземным способом / С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, С.Н. Корнилов, Н.Г. Томилина // Горный журнал. – 2016. – № 5 (2226). – С. 41–47.
23. Pozynich K., Telnova S., Pozynich E. Sandwich belt high-angle conveyors in solving the transportation problems of deep open pits // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Trans Siberia. – 2019. – V. 2. – P. 110–124.
24. Райзберг Б.А., Лозовский Л.Ш., Стародубцева Е.Б. Современный экономический словарь. 2-е изд. – М.: ИНФРА-М, 1999. – 479 с.
25. Вербицкий А.А. Энциклопедический словарь по психологии и педагогике. – М.: Изд-во ПСТГУ, 2013. – 400 с.
26. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений / В.Л. Яковлев, И.В. Соколов, Г.Г. Саканцев, И.Л. Кравчук // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 46–50.
27. The effectiveness of combining the stages of ore fields development / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, Z. Khasheva // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – V. 7. – № 5. – P. 401–405.
28. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental study of non-waste recycling tailings ferruginous quartzite // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – V. 10. – № 15. – P. 35410–35416.
29. Бутаков В., Фаградянц И. Политехнический терминологический толковый словарь. – М.: Polyglossum, 2014. – 526 с.
30. Невдяев Л.М. Телекоммуникационные технологии. Англо-русский толковый словарь-справочник / под ред. Ю.М. Горностаева. – М., 2002. – 592 с.
31. Горная энциклопедия / под ред. Е.А. Козловского. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 560 с.
32. Практическая реализация механизма устойчивого развития в создании и становлении горно-металлургического холдинга медной отрасли России / И.А. Алтушкин, А.Е. Череповицын, Ю.А. Король. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2016. – 232 с.
33. Christmann P. Mining Industry // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. – Elsevier, 2020. – P. 433–443.
34. The state of environmental sustainability considerations in mining / M. Tost, M. Hitch, V. Chandurkar, P. Moser, S. Feiel // Journal of Cleaner Production. – 2018. – V. 182. – P. 969–977.
35. Identifying and clarifying environmental policy best practices for the mining industry—A systematic review / F.X. Tuokuu, U. Idemudia, J.S. Gruber, J. Kayira // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 222. – P. 922–933.
36. Monteiro N.B., Da Silva E.A., Moita Neto J.M. Sustainable development goals in mining // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 228. – P. 509–520.
37. Zhu X., Chen Y., Feng C. Green total factor productivity of China's mining and quarrying industry: a global data envelopment analysis // Resources Policy. – 2018. – V. 57. – P. 1–9.
38. A review of studies on sustainable development in mining life cycle / E.T. Asr, R. Kakaie, M. Ataei, M.R. Tavakoli Mohammadi // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 229. – P. 213–231.
39. Green logistics: element of the sustainable development concept. P. 1 / A. Rakhmangulov, A. Sladkowski, N. Osintsev, D. Muravev // Nase More. – 2017. – № 64 (3). – P. 120–126.
40. Ряховская А.Н. Устойчивое функционирование и развитие предприятий: основные механизмы, принципы, критерии оценки // Эффективное антикризисное управление. – 2012. – № 2 (71). – С. 58–66.
41. Conference of the Parties – Twenty-first session. – Paris, 30.11–11.12.2015. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf> (дата обращения 20.05.2019).
42. Галиев С.Ж., Юсупова Л.И. Проблемы устойчивого развития горнодобывающего комплекса Казахстана // Доклад на Minex. – Казахстан, 2013. – 8 с.
43. Устойчивое развитие горнодобывающих предприятий и регионов в рамках концепции synchro-mining / А.Н. Шашенко, М.С. Пашкевич, А.В. Солодянкин, С.Н. Гапеев, С.А. Воронин // Перспективы развития строительных технологий: 8-я междунауч.-практ. конф. – Д.: Национальный горный университет, 2014. – С. 184–191.
44. Ускова Т.В. Управление устойчивым развитием региона: монография. – Вологда: ИСЭРТ РАН, 2009. – 355 с.
45. Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., Багинова В.В. Инновации в области зеленой логистики // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 196–211.
46. Shi H.-q. Mine green mining // Energy Procedia. – 2012. – V. 16. – P. 409–416.
47. Dubiński J. Sustainable development of mining mineral resources // Journal of Sustainable Mining. – 2013. – V. 12. – № 1. – P. 1–6.
48. Dutta R. Green mining of rare Earth elements (REE) to diminish greenhouse gas (GHG) footprint // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. – Elsevier, 2020. – P. 513–525.
49. Dominy S., O'Connor L., Parbhakar-Fox A. Geometallurgy – a route to more resilient mine operations // Minerals. – 2018. – V. 8. – № 12. – P. 560.
50. Aasly K., Ellefmo S. Geometallurgy applied to industrial minerals operations // Mineralproduksjon. – 2014. – V. 5. – A21–A34.
51. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?menu=2361> (дата обращения 20.05.2019).
52. Green logistics: a system of methods and instruments. P. 2 / A. Rakhmangulov, A. Sladkowski, N. Osintsev, D. Muravev // Nase More. – 2018. – № 65 (1). – P. 49–55.
53. Юн А.Б. Разработка и обоснование параметров горнотехнической системы комплексного освоения Жезказганского месторождения в условиях восполнения выбывающих мощностей рудников: дисс. ... д-ра техн. наук. – Караганда, 2016. – 333 с.
54. Jeswiet J. Including towards sustainable mining in evaluating mining impacts // Procedia CIRP. – 2017. – V. 62. – P. 494–499.
55. Федаш А.В. Принципы создания системы управления качеством проектов угледобывающих предприятий // Уголь. – 2013. – № 1(1042). – С. 73–74.
56. Каплунов Д.Р., Чаплыгин Н.Н., Рыльникова М.В. Принципы проектирования комбинированных технологий при освоении крупных месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. – 2003. – № 12. – С. 21–25.
57. Molotilov S.G., Cheskidov V.I., Norri V.K. Methodical principles for planning the mining and loading equipment capacity for open cast mining with the use of dumpers. P. I // Journal of Mining Science. – 2008. – V. 44. – № 4. – P. 376–385.

58. Methodical principles for planning the mining and loading equipment capacity for open cast mining with the use of dumpers. P. II: Engineering capacity calculation / S.G. Molotilov, V.I. Cheskidov, V.K. Norri, A.A. Botvinnik // *Journal of Mining Science*. – 2009. – V. 45. – № 1. – P. 43–58.
59. Methodical principles for planning the mining and loading equipment capacity for open cast mining with the use of dumpers. P. III: Service capacity determination / S.G. Molotilov, V.I. Cheskidov, V.K. Norri, A.A. Botvinnik, D. Kh. Il'bul'din // *Journal of Mining Science*. – 2010. – V. 46. – № 4. – P. 38–49.
60. Ramani R.V. Surface mining technology: progress and prospects // *Procedia Engineering*. – 2012. – V. 46. – P. 9–21.
61. Kalabin G.V. Principles of macro-ecological risk mapping of mining industry areas // *Journal of Mining Science*. – 2012. – V. 48. – № 6. – P. 1071–1078.
62. Ракишев Б.Р. Проектирование карьеров. – Алматы: КазННТУ им. К.И. Сатпаева, 2013. – 298 с.
63. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Принципы проектирования и реализации горнотехнических систем с полным циклом освоения рудных месторождений // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2013. – № 27. – С. 3–11.
64. Хохряков В.С. Проектирование карьеров. – М.: Недра, 1992. – 383 с.
65. Соколовский А.В. Принципы проектирования развития действующего карьера // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2007. – № 12. – С. 21–26.
66. Williams D.J. Applying geomechanics principles to mine waste management / 7<sup>th</sup> International Congress on Environmental Geotechnics: 7ICEG. – Australia, 2014. – P. 198–205.
67. Обоснование принципов развития геотехнологии подземной разработки жильных месторождений / Г.А. Курсакин, А.А. Фаткулин, В.Н. Макишин, А.В. Жуков // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Специальный выпуск. – 2013. – № 12. – С. 61–74.
68. Overburden management in open pits: options and limits in large limestone quarries / C. Oggeri, T.M. Fenoglio, A. Godio, R. Vinai // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2019. – V. 29. – № 2. – P. 217–228.
69. Claassen J.O. Application of systemic flow-based principles in mining // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2015. – V. 115. – № 8. – P. 747–754.
70. ICMM 10 Principles. URL: <https://www.icmm.com/en-gb/members/member-commitments/icmm-10-principles> (дата обращения 20.05.2019).
71. Erzurumlu S.S., Erzurumlu Y.O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis // *Resources Policy*. – 2015. – V. 46. – P. 6–14.
72. Fraser J. Creating shared value as a business strategy for mining to advance the United Nations Sustainable Development Goals // *The Extractive Industries and Society*. – 2019. – V. 6. – № 3. – P. 788–791.
73. Lawrence R., Moritz S. Mining industry perspectives on indigenous rights: Corporate complacency and political uncertainty // *The Extractive Industries and Society*. – 2019. – V. 6. – № 1. – P. 41–49.
74. Mills T. Fully armed: is the application of the arm's length principle the best method to address transfer mispricing in the mining industry in developing countries? // *The Extractive Industries and Society*. – 2019. – V. 6. – № 4. – P. 1075–1078.
75. Nourali H., Osanloo M. A new cost model for estimation of open pit copper mine capital expenditure // *International Journal of Engineering*. – 2019. – V. 32. – № 2. – P. 346–353.
76. Mining at the crossroads: sectoral diversification to safeguard sustainable mining? / W. de Lange, B. de Wet, L. Haywood, W. Stafford, C. Musvoto, I. Watson // *The Extractive Industries and Society*. – 2018. – V. 5. – № 3. – P. 269–273.
77. Effectiveness of using learning factories to impart Lean principles in mining employees / S. Makumbe, T. Hattingh, N. Plint, D. Esterhuizen // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – V. 23. – P. 69–74.
78. Mancini L., Sala S. Social impact assessment in the mining sector: review and comparison of indicators frameworks // *Resources Policy*. – 2018. – V. 57. – P. 98–111.
79. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Принципы обоснования параметров устойчивого и экологически сбалансированного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Специальный выпуск. – 2014. – № 2. – С. 3–10.
80. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgatyi L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste // *The Social Sciences (Pakistan)*. – 2015. – V. 10. – № 6. – P. 750–754.
81. Принципы управления безопасностью производства при совершенствовании технологических схем карьеров / А.В. Цыганов, Н.А. Осинцев, К.В. Бурмистров, А.А. Колодюк, В.Ю. Заляднов // Проблемы повышения экологической и промышленной безопасности производственно-технических комплексов промышленных регионов: Сб. науч. тр. 4 всерос. конф. МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2004. – С. 66–68.
82. Лапаев В.Н., Пикалов В.А. Принципы проектирования высокопроизводительных горнотехнических систем карьеров // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2011. – № S11. – С. 429–435.
83. Fleurisson J.-A. Slope design and implementation in open pit mines: geological and geomechanical approach // *Procedia Engineering*. – 2012. – V. 46. – P. 27–38.
84. Open pit mine waste dump area design based on stability principles / C.A. Ozturk, S. Ercelebi, I.E. Onsel et al. // *International Mining Congress and Exhibition of Turkey: 24<sup>th</sup> International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET'15*. – Turkey, 2015. – P. 570–578.
85. Paramonov G.P., Mysyn A. V., Babkin R. S. Formation of load parameters of destroyed massifs in explosion of multicharge Composition with separation of its parts by profile inert interval // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – V. 5. – № 87. – P. 11–16.
86. Baranov E.G., Tangaev I.A. Energy principles for analysis and optimization of mining and ore preparation processes // *Soviet Mining Science*. – 1989. – V. 25. – № 4. – P. 334–345.
87. Open-pit mine truck real-time dispatching principle under macroscopic control / Q. Wang, Y. Zhang, C. Chen, W. Xu // *First International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC'06)*. – China, 2006. – V. I. – P. 702–706.
88. Формирование технологических схем безопасной работы карьеров: монография / А.В. Цыганов, Н.А. Осинцев, С.Е. Гавришев, А.Н. Рахмангулов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 166 с.
89. Selyukov A.V. Advanced technology based on new technological and organization principles of spatial development of front of mining operation at open pits // *Chinese coal in XXI century: mining, green and safety: Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control*. – Qindao, China, 17–20 October 2014. – P. 156–160.
90. Взаимодействие транспортных звеньев в комбинированных транспортных системах глубоких карьеров / Ю.И. Лель, С.В. Исаков, А.Л. Костин, О.Э. Ширинкин // *Уральская горная школа – регионам: Сб. докладов междунауч.-практ. конф.* – Екатеринбург, 11–12 апреля 2016. – Екатеринбург: Изд-во Уральского горно-геологического университета, 2016. – С. 400–401.
91. Энергетический принцип оценки и оптимизации параметров транспортных систем карьеров / Ю.И. Лель, Е.С. Калужный, С.В. Исаков, О.А. Иванова // *Уральская горная школа – регионам: Сб. докладов междунауч.-практ. конф.* – Екатеринбург, 11–12 апреля 2016. – Екатеринбург: Изд-во Уральского горно-геологического университета, 2016. – С. 417–418.
92. Громов Е.В. Повышение эффективности разработки месторождений бедных руд в условиях экологических ограничений (на примере апатит-нефелинового месторождения «Партомчорр»): дис. ... канд. техн. наук. – Апатиты, 2016. – 164 с.
93. Оценка эффективности схем вскрытия законтурных запасов с применением карьерных подъемников / С.Е. Гавришев, В.Н. Калмыков, К.В. Бурмистров, Н.Г. Томилина, В.Ю. Заляднов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2014. – № 1. – С. 8–12.
94. Braun T., Hennig A., Lottermoser B.G. The need for sustainable technology diffusion in mining: Achieving the use of belt

- conveyor systems in the German hard-rock quarrying industry // Journal of Sustainable Mining. – 2017. – V. 16. – № 1. – P. 24–30.
95. Карьерное подъемное устройство: пат. РФ 186195; опубл. 11.01.2019. – Бюл. № 2.
96. Reliable and cost-effective: ThyssenKrupp to deliver conveyor system for new underground copper mine in Mongolia // Mining World. – 2017. – V. 14. – № 4. – P. 20. URL: <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/reliable-and-cost-effective--thyssenkrupp-to-deliver-conveyor-system-for-new-underground-copper-mine-in-mongolia-1586.html> (дата обращения 11.06.2019).

*Поступила 12.03.2020 г.*

#### **Информация об авторах**

**Бурмистров К.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

**Осинцев Н.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

UDC 622.012:338.3

## PRINCIPLES OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF MINING AND TECHNICAL SYSTEMS IN TRANSITIONAL PERIODS

Konstantin V. Burmistrov<sup>1</sup>,  
k.burmistrov@magtu.ru

Nikita A. Osintsev<sup>1</sup>,  
osintsev@magtu.ru

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
38, Lenin avenue, Magnitogorsk, 455000, Russia.

**The relevance.** Functioning of mining operations in modern conditions is characterized by the active influence of external and internal factors. In the conditions of unstable external environment, upon transition from one development stage to another, subsystems of mining operations have to submit to the purpose of ensuring steady functioning of the enterprise – providing output streams with the set parameters. During this period stability of mining and technical systems changes that have an impact on a condition of economic and social subsystems of mining operations, and also on the state of environment caused by changes in parameters of technology and engineering procedures. It demands the development of the new approaches and the management principles of work of the mining operations based on coordination of economic targets with the purposes in the field of ecology and social development.

**The main aim** of the research is to form sustainable development concept of mining and technical systems in transitional periods of open pit mining based on systematization of the existing principles of sustainable development in the mining industry.

**Objects:** mining operations, mining and technical systems, opening-up system of opencast.

**Methods:** literature review, structural and functional analysis, system analysis.

**Results.** The paper substantiates the key role of the opening-up system of opencast in the structure of the mining and technical systems for achieving sustainable development goals of the mining operations. The systematization of the sustainable functioning and development principles of the mining operations and their systems were carried out, four groups of principles were highlighted: system-wide principles of management, development principles of the mining operations, development principles of mining and technical systems, development principles of the subsystems of mining and technical systems. The idea of consecutive transformation of the subsystems of mining and technical systems at all design stages and operation considering economic, social and ecological aspects for ensuring the established parameters of functioning of the mining operations is the basis for the offered system of the principles. The authors proposed the concept of sustainable development of mining and technical systems in transitional periods of open pit mining. The use of the proposed approach during transition from open pit mining to the open-underground mining allows us to improve the economic, environmental and social indicators of the functioning of the mining operations systems.

### Key words:

Principles, mining operations, mining and technical system, opening-up of an opencast system, sustainable functioning, sustainable development, transition period, mining transport.

### REFERENCES

- Katz J., Pietrobello C. Natural resource based growth, global value chains and domestic capabilities in the mining industry. *Resources Policy*, 2018, vol. 58. pp. 11–20.
- Finanz.ru*. Available at: <http://www.finanz.ru> (accessed 11 June 2019).
- The London Metal Exchange*. Available at: <https://www.lme.com> (accessed 11 June 2019).
- Abdollahisharif J., Bakhtavar E., Shahriar K. Open-pit to underground mining – Where is the optimum transition depth? *21<sup>st</sup> WMC & Expo 2008*. London, 2008. pp. 189–196.
- Reshetnyak S.P. Perspektivy razvitiya otkrytogo sposoba razrabotki na osnove effektivnogo primeneniya informatsionnykh tekhnologiy [Prospects for development of an open pit mine based on the effective use of information technologies]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsi. Otkrytye gornye raboty v XXI veke* [Proceedings of the international scientific-practical conference. Open Mining in the Twenty-first Century]. Chelyabinsk, NTC Mining LLC, 2011. pp. 207–213.
- Paricheh M., Osanloo M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties. *16<sup>th</sup> International Conference on Computer Applications in the Mineral Industries*. Istanbul, Turkey, 2016. p. 34.
- Czaplicki J.M. *Shovel-truck systems. Modelling analysis and calculation*. London, CRC Press, 2009. 172 p.
- Yakovlev V.L., Bahturin Yu.A., Zhuravlev A.G. Osnovnye aspekty formirovaniya i novye nauchnye napravleniya issledovaniya transportnykh sistem karerov [The main aspects of formation and new scientific directions of research of transport systems of quarries]. *Nauka i Obrazovanie*, 2015, no. 4. pp. 67–72.
- Shpansky O.V. Vliyaniye kapitalnoy skhemy vskrytiya na konechnyye kontury karerov [The impact of capital schemes of opening on the final contours of quarries]. *Gornyy Zhurnal*, 2002, no. 11–12. pp. 37–42.
- Trubetskoy K.N., Krasnyansky G.L., Chronin V.V. *Proektirovaniye karerov*. Ch. II [Design of open pit. P. II]. Moscow, Academy of Mining Sciences Publ. house, 2001. 535 p.
- Rzhevskiy V.V. *Otkrytye gornye raboty*. Ch. 2. Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya [Open pit mining. P. 2. Technology and integrated mechanization]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 549 p.
- Gibadullin Z.R., Krasavin V.P., Samusenko A.K. Tekhnologiya razrabotki mestorozhdeniy Uchalinskogo GOKa [Mining technology of Uchalinsky GOK deposits]. *Gornyy Zhurnal*, 2004, no. 6. pp. 25–30.
- Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Printsipy proektirovaniya gornotekhnicheskikh sistem kompleksnogo osvoeniya rudnykh mestorozhdeniy kombinirovannoy geotekhnologiy [Principles of design of mining systems for integrated development of ore deposits with combined geotechnology]. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 2008, no. 6. pp. 58–66.
- Sokolovsky A.V. *Metodologiya proektirovaniya tekhnologicheskogo razvitiya deystvuyushchikh karerov*. Dis. Dr. nauk [Methodology for design of technological development of open pit mine. Dr. Diss.]. Moscow, 2009. 38 p.

15. Yutyaev A.V. *Kompleksnoe obosnovanie parametrov gornotekhnicheskikh sistem vysokoproizvoditelnykh ugolnykh shakht*. Dis. Kand. nauk [Comprehensive substantiation of the parameters of mining systems of high-performance coal mines. Cand. Diss.]. Moscow, 2017. 129 p.
16. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Designing the formation and development of mining systems with combined geotechnology. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2015, no. S1-1, pp. 229–240. In Rus.
17. Trubetskoy K.N., Krasnyansky G.L., Khronin V.V., Kovalenko V.S. *Proektirovanie karerov* [Quarry design]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009. 694 p.
18. Yakovlev V.L. *Teoriya i praktika vybora transporta glubokikh karerov* [Theory and practice of transport choice of deep quarries]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 240 p.
19. Drizhenko A.Yu. Development of the theory of mining and mining transport systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2014, no. 6, pp. 134–142. In Rus.
20. Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Shakshakpaev A.N. The Selection of open-pit dump trucks at the reconstruction of quarry. *Procedia Engineering*, 2017, no. 206, pp. 1696–1702.
21. Burmistrov K.V. Justification of the developing system in the mining transitional stages. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2015, S1-1, pp. 291–300. In Rus.
22. Gavrishchev S.E., Burmistrov K.V., Kornilov S.N., Tomilina N.G. Obosnovanie tekhnologicheskikh skhem transportirovaniya gornoy massy s primeneniem karernykh podemnikov pri razrabotke mestorozhdeniy otkryto-podzemnym sposobom [Justification of technological schemes for transportation of rock mass using quarry lifts in the development of deposits by the open-underground method]. *Gornyi Zhurnal*, 2016, no. 5 (2226), pp. 41–47.
23. Pozynich K., Telnova S., Pozynich E. Sandwich belt high-angle conveyors in solving the transportation problems of deep open pits. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Trans Siberia*, 2019, vol. 2, pp. 110–124.
24. Raizberg B.A., Lozovskiy L.Sh., Starodubtseva E.B. *Sovremenny ekonomicheskii slovar* [Modern economic dictionary]. Moscow, INFRA-M Publ., 1999. 479 p.
25. Verbitsky A.A. *Entsiklopedicheskiy slovar po psikhologii i pedagogike* [Encyclopedic dictionary on psychology and pedagogy]. Moscow, PSTGU Publ., 2013. 400 p.
26. Yakovlev V.L., Sokolov I.V., Sakantsev G.G., Kravchuk I.L. Issledovanie perekhodnykh protsessov pri kombinirovannoy razrabotke rudnykh mestorozhdeniy [Investigation of transition period in the combined development of ore deposits]. *Gornyi Zhurnal*, 2017, no. 7, pp. 46–50.
27. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development. *Metalurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 401–405.
28. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental study of non-waste recycling tailings ferruginous quartzite. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 15, pp. 35410–35416.
29. Butakov V., Fagradants I. *Politekhnichestkiy terminologicheskii slovar* [Polytechnic terminological explanatory dictionary]. Moscow, Polyglossum, 2014. 224 p.
30. Nevdyayev L.M. *Telekommunikatsionnye tekhnologii. Anglorusskiy tolkovy slovar-spravochnik* [Telecommunication technology. English-Russian explanatory dictionary-directory]. Moscow, 2002. 592 p.
31. Kozlovskiy E.A. *Gornaya entsaiklopediya* [Mountain encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1984. 560 p.
32. Altushkin I.A., Cherepovitsyn A.E., Korol Yu.A. *Prakticheskaya realizatsiya mekhanizma ustoychivogo razvitiya v sozdanii i stanovlenii gorno-metallurgicheskogo kholdinga mednoy otrasli Rossii* [Practical implementation of sustainable development mechanism in creation of mining and metallurgical holding of the copper industry in Russia]. Moscow, Rudy i metally Publ. house, 2016. 232 p.
33. Christmann P. Mining Industry. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier, 2020. pp. 433–443.
34. Tost M., Hitch M., Chandurkar V., Moser P., Feiel S. The state of environmental sustainability considerations in mining. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 182, pp. 969–977.
35. Tuokuu F.X., Idemudia U., Gruber J.S., Kayira J. Identifying and clarifying environmental policy best practices for the mining industry – a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 222, pp. 922–933.
36. Monteiro N.B., Da Silva E.A., Moita Neto J.M. Sustainable development goals in mining. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 228, pp. 509–520.
37. Zhu X., Chen Y., Feng C. Green total factor productivity of China's mining and quarrying industry: a global data envelopment analysis. *Resources Policy*, 2018, vol. 57, pp. 1–9.
38. Asr E.T., Kakaie R., Ataei M., Tavakoli Mohammadi M.R. A review of studies on sustainable development in mining life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 229, pp. 213–231.
39. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green logistics: element of the sustainable development concept. P. 1. *Nase More*, 2017, vol. 64, no. 3, pp. 120–126.
40. Ryakhovskaya A.N. Ustoychivoe funktsionirovanie i razvitie predpriyatiy: osnovnye mekhanizmy, printsipy, kriterii otsenki [Sustainable functioning and development of enterprises: basic mechanisms, principles, evaluation criteria]. *Effektivnoe anti-krizisnoe upravlenie*, 2017, no. 2 (71), pp. 58–66.
41. *Conference of the Parties – Twenty-first session*. Paris, 2015. Available at: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/09r01.pdf> (accessed 20 May 2019).
42. Galiev S.Zh., Yusupova L.I. Problemy ustoychivogo razvitiya gornodobyvayushchego kompleksa Kazakhstana [Problems of sustainable development of the mining complex of Kazakhstan]. *Doklad na Minex* [Report on Minex]. Kazakhstan, 2013. 8 p.
43. Shashenko A.N., Pashkevich M.S. Solodyankin A.V., Gapeev S.N., Voronin S.A. Ustoychivoe razvitie gornodobyvayushchikh predpriyatiy i regionov v ramkakh kontseptsii synkhro-mining [Sustainable development of mining enterprises and regions within the concept of synchro-mining]. *Perspektivy razvitiya stroitelnykh tekhnologiy. 8-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Proceedings of the 8<sup>th</sup> International scientific-practical conference. Prospects for the Development of Building Technologies]. Dnepropetrovsk, National Mining University Publ., 2014. pp. 184–191.
44. Uskova T.V. *Upravlenie ustoychivym razvitiem regiona: monografiya* [Management of sustainable development of the region: a monograph]. Vologda, ISEDT RAS, 2009. 355 p.
45. Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Baginova V.V. Innovatsii v oblasti zelyonoy logistiki [Innovations in the sphere of green logistics]. *Mir Transporta*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 196–211.
46. Shi H.-Q. Mine green mining. *Energy Procedia*, 2012, vol. 16, pp. 409–416.
47. Dubinski J. Sustainable development of mining mineral resources. *Journal of Sustainable Mining*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 1–6.
48. Dutta R. Green mining of rare Earth elements (REE) to diminish greenhouse gas (GHG) footprint. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier, 2020. pp. 513–525.
49. Dominy S., O'Connor L., Parbhakar-Fox A. Geometallurgy – a route to more resilient mine operations. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 12, p. 560.
50. Aasly K., Ellefmo S. Geometallurgy applied to industrial minerals operations. *Mineralproduksjon*, 2014, vol. 5, A21–A34.
51. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Available at: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?menu=2361> (accessed 20 May 2019).
52. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green logistics: a system of methods and instruments. P. 2. *Nase More*, 2018, vol. 65, no. 1, pp. 49–55.
53. Yun A.B. *Razrabotka i obosnovanie parametrov gornotekhnicheskoy sistemy kompleksnogo osvoeniya Zhezkazganskogo mestorozhdeniya v usloviyakh vospolneniya vybyvayushchikh moshchnostey rudnikov*. Dis. Dokt. nauk [Development and substantiation of the parameters of the mining system of integrated development of the Zhezkazgan field in terms of replenishing the outgoing capacity of mines. Dr. Diss.]. Karaganda, 2016. 333 p.
54. Jeswiet J. Including towards sustainable mining in evaluating mining impacts. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 62, pp. 494–499.
55. Fedash A.V. Printsipy sozdaniya sistemy upravleniya kachestvom proektov ugledobyvayushchikh predpriyatiy [Principles of establishing coal production company project quality management system]. *Ugol*, 2013, no. 1 (1042), pp. 73–74.

56. Kaplunov D.R., Chaplygin N.N., Rylnikova M.V. Printsipy proektirovaniya kombinirovannykh tekhnologiy pri osvoenii krupnykh mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh [Principles of design of combined technologies in the development of large solid mineral deposits]. *Gornyi Zhurnal*, 2003, no. 12, pp. 21–25.
57. Molotilov S.G., Cheskidov V.I., Norri V.K. Methodical principles for planning the mining and loading equipment capacity for open cast mining with the use of dumpers. P. I. *Journal of Mining Science*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 376–385.
58. Molotilov S.G., Cheskidov V.I., Norri V.K., Botvinnik A.A. Methodical principles for planning the mining and loading equipment capacity for open cast mining with the use of dumpers. P. II: Engineering capacity calculation. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 43–58.
59. Molotilov S.G., Cheskidov V.I., Norri V.K., Botvinnik A.A., Il'bul'din D.Kh. Methodical principles for planning the mining and loading equipment capacity for open cast mining with the use of dumpers. P. III: Service capacity determination. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 38–49.
60. Ramani R.V. Surface mining technology: progress and prospects. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 46, pp. 9–21.
61. Kalabin G.V. Principles of macro-ecological risk mapping of mining industry areas. *Journal of Mining Science*, 2012, vol. 48, no. 6, pp. 1071–1078.
62. Rakishev B.R. *Proektirovanie karerov* [Open pit design]. Almaty, KazNTU Publ., 2013. 298 p.
63. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Principles of design and implementation of mining systems with a full cycle of development of ore deposits. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2013, no. 27, pp. 3–11. In Rus.
64. Khokhryakov B.C. *Proektirovanie karerov* [Open pit design]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 383 p.
65. Sokolovsky A.V. Principles for designing the development of an existing career. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2007, no. 12, pp. 21–26. In Rus.
66. Williams D.J. Applying geomechanics principles to mine waste management. *7th International Congress on Environmental Geotechnics: 7ICEG-2014*. Australia, 2014. pp. 198–205.
67. Kursakin G.A., Fatkulin A.A., Makishin V.N., Zhukov A.V. Justification of the principles of geotechnical development of underground mining of vein deposits. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2013, no. 12, pp. 61–74. In Rus.
68. Oggeri C., Fenoglio T.M., Godio A., Vinai R. Overburden management in open pits: Options and limits in large limestone quarries. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 217–228.
69. Claassen J.O. Application of systemic flow-based principles in mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2015, vol. 115, no. 8, pp. 747–754.
70. *ICMM 10 Principles*. Available at: <https://www.icmm.com/en-gb/members/member-commitments/icmm-10-principles> (accessed 20 May 2019).
71. Erzurumlu S.S., Erzurumlu Y.O. Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis. *Resources Policy*, 2015, vol. 46, pp. 6–14.
72. Fraser J. Creating shared value as a business strategy for mining to advance the United Nations Sustainable Development Goals. *The Extractive Industries and Society*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 788–791.
73. Lawrence R., Moritz S. Mining industry perspectives on indigenous rights: Corporate complacency and political uncertainty. *The Extractive Industries and Society*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 41–49.
74. Mills T. Fully armed: is the application of the arm's length principle the best method to address transfer mispricing in the mining industry in developing countries? *The Extractive Industries and Society*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 1075–1078.
75. Nourali H., Osanloo M. A new cost model for estimation of open pit copper mine capital expenditure. *International Journal of Engineering*, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 346–353.
76. De Lange W., De Wet B., Haywood L., Stafford W., Musvoto C., Watson I. Mining at the crossroads: Sectoral diversification to safeguard sustainable mining? *The Extractive Industries and Society*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 269–273.
77. Makumbe S., Hattingh T., Plint N., Esterhuizen D. Effectiveness of using Learning Factories to impart Lean principles in mining employees. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 23, pp. 69–74.
78. Mancini L., Sala S. Social impact assessment in the mining sector: review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy*, 2018, vol. 57, pp. 98–111.
79. Trubetsky K.N., Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Principles of substantiation of parameters of sustainable and environmentally balanced development of solid mineral deposits. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2014, no. 2, pp. 3–10. In Rus.
80. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste. *The Social Sciences (Pakistan)*, 2015, vol. 10, no. 6, pp. 750–754.
81. Tsyganov A.V., Osintsev N.A., Burmistrov K.V., Kolonyuk A.A., Zalyadnov V.Yu. Printsipy upravleniya bezopasnostyu proizvodstva pri sovershenstvovanii tekhnologicheskikh skhem karerov [Principles of production safety management while improving technological schemes of quarries]. *Problemy povysheniya ekologicheskoy i promyshlennoy bezopasnosti proizvodstvenno-tekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh regionov* [Problems of improving the environmental and industrial safety of production and technical complexes of industrial regions]. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2004. pp. 66–68.
82. Lapaev V.N., Pikalov V.A. Principles of designing high-performance mining and technical systems of quarries. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2011, no. S11, pp. 429–435. In Rus.
83. Fleurisson J.-A. Slope design and implementation in open pit mines: geological and geomechanical approach. *Procedia Engineering*, 2013, no. 46, pp. 27–38.
84. Ozturk C.A., Ercelebi S., Önsel I.E. Open pit mine waste dump area design based on stability principles. *24<sup>th</sup> International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET'15*. Turkey, 2015. pp. 570–578.
85. Paramonov G.P., Mysin A.V., Babkin R.S. Formation of load parameters of destroyed massive in explosion of multicharge composition with separation of its parts by profile inert interval. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, no. 5, pp. 11–16.
86. Baranov E.G., Tangaev I.A. Energy principles for analysis and optimization of mining and ore preparation processes. *Soviet Mining Science*, 1989, vol. 25, no. 4, pp. 334–345.
87. Wang Q., Zhang Y., Chen C., Xu W. Open-pit Mine truck real-time dispatching principle under macroscopic control. *First International Conference on Innovative Computing, Information and Control. (ICIC'06)*. China, 2006. Vol. I, pp. 702–706.
88. Tsyganov A.V., Osintsev N.A., Gavrishev S.E., Rakhmangulov A.N. *Formirovanie tekhnologicheskikh skhem bezopasnoy raboty karerov: monografiya* [Formation of technological schemes for the safe operation of quarries: monograph]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2014. 166 p.
89. Selyukov A.V. Advanced technology based on new technological and organization principles of spatial development of front of mining operation at open pits. *Chinese coal in XXI century: mining, green and safety. Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control*. Qindao, China, 2014. pp. 156–160.
90. Lel Yu.I., Isakov S.V., Kostin A.L., Shirinkin O.E. Vzaimodeystvie transportnykh zvenev v kombinirovannykh transportnykh sistemakh glubokikh karerov [Interaction of transport links in the combined transport systems of deep quarries]. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Uralskaya Gornaya Shkola – Regionam* [International Scientific and Practical Conference Ural Mountain School – Regions]. Yekaterinburg, UGGU Publ., 2016. pp. 400–401.
91. Lel Yu.I., Kalyuzhny. E.S., Isakov S.V., Ivanova O.A. Energeticheskii printsip otsenki i optimizatsii parametrov transportnykh sistem karerov [Energy principle of estimation and optimization of the parameters of quarry transport systems]. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Uralskaya Gornaya Shkola – Regionam* [International Scientific and Practical Conference Ural Mountain School – Regions]. Yekaterinburg, URSMU Publ. house, 2016. pp. 417–418.
92. Gromov E.V. *Povyshenie effektivnosti razrabotki mestorozhdeniy bednykh rud v usloviyakh ekologicheskikh ogranicheniy (na primere apatit-nefelinovogo mestorozhdeniya «Partomchorr»)*. Dis. Kand. nauk [Improving the efficiency of the development of deposits of poor ores in the conditions of environmental constraints

- (for example, the Partomchorr apatite-nepheline deposit) Cand. Diss.]. Apality, 2016, p. 164.
93. Gavrishev S.E., Kalmykov V.N., Burmistrov K.V., Tomilina N.G., Zalyadnov V.Yu. Otsenka effektivnosti skhem vskrytiya zakonturnykh zapasov s primeneniem karernykh podemnikov [Evaluation of the effectiveness of schemes for the opening of marginal reserves using career lifts]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2014, no. 1, pp. 8–12.
94. Braun T., Hennig A., Lottermoser B.G. The need for sustainable technology diffusion in mining: Achieving the use of belt conveyor systems in the German hard-rock quarrying industry. *Journal of Sustainable Mining*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 24–30.
95. Gogotin A.A., Kalmykov V.N., Gavrishev S.E., Burmistrov K.V. *Karerno podemnoe ustroystvo* [Career lift]. Patent RF 186195, 2019.
96. Reliable and cost-effective: thyssenkrupp to deliver conveyor system for new underground copper mine in Mongolia. *Mining World*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 20. Available at <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/reliable-and-cost-effective--thyssenkrupp-to-deliver-conveyor-system-for-new-underground-copper-mine-in-mongolia-1586.html> (accessed 11 June 2019).

*Received: 12 March 2020.*

#### **Information about the authors**

**Konstantin V. Burmistrov**, Cand. Sc., associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University.

**Nikita A. Osintsev**, Cand. Sc., associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University.

УДК 624.131.3

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Татаурова Антонина Андреевна<sup>1</sup>,  
TataurovaAA@ipgg.sbras.ru

Мельник Елена Александровна<sup>1</sup>,  
MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Стефанов Юрий Павлович<sup>1</sup>,  
yu\_st@mail.ru

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

**Актуальность работы.** Строительство промышленных объектов на участках со сложным рельефом и геологическим строением нередко требует проведения расчетов напряженно-деформированного состояния с целью получения оценок возможных зон развития необратимой деформации. Данная задача может быть решена с помощью численного моделирования. В настоящей работе рассмотрен участок планируемого строительства электродепо «Волочаевское» Дзержинской линии Новосибирского метрополитена. Сложный рельеф и низкие прочностные характеристики зоны строительства требуют особого внимания к оценке несущей способности грунта и устойчивости склонов близкорасположенных оврагов. Применение численного моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния среды с использованием геофизических данных о ее строении и механических свойствах позволили получить информацию о зонах концентрации напряжений и возможного развития необратимой деформации.

**Цель:** определить существующее напряженно-деформированное состояние и оценить устойчивость верхней части геологического разреза на основе имеющихся петрофизических и геофизических данных, полученных с использованием сейсмо- и электроразведки.

**Объект:** геологический разрез, проходящий вдоль участка продления Дзержинской линии Новосибирского метрополитена электродепо «Волочаевское».

**Методы.** Расчет напряженно-деформированного состояния грунта в зоне строительства осуществлялся при помощи численного моделирования. Задача решалась в упругопластической постановке. Геометрические и геомеханические параметры среды были получены в ходе анализа петрофизических и геофизических данных.

**Результаты.** Рассмотрено сечение среды, которое пересекает участок строительства электродепо «Волочаевское» Дзержинской линии Новосибирского метрополитена. Представлены две геомеханические модели. Первая горизонтально-слоистая и построена на основе сейсморазведочных данных. Вторая более сложная, учитывает также данные о неоднородностях, выделенных на основе распределения удельного электрического сопротивления. Показано, что для исследуемой территории характерна общая деформация, связанная с наличием зон, обладающих пониженной прочностью, которые выделяются при комплексном анализе данных электроразведки и петрофизики. Несмотря на то, что учет этих зон не привел к значимым изменениям в напряженно-деформированном состоянии среды, было показано, что в приповерхностной части земной коры возможно формирование зон локализации необратимой деформации и трещиноватости. Установлено, что зоны с резким перепадом рельефа представляют наибольшую опасность и будут разрушаться в первую очередь.

### Ключевые слова:

Геомеханика, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, деформация, разрушение, геофизические исследования, г. Новосибирск.

### Введение

Оценка возможного развития деформационных процессов и предотвращения достижения критических величин в грунтах является важной геологической задачей [1, 2]. С этой целью осуществляется расчленение геологического разреза и установление литологических границ, выявление и прослеживание неоднородностей строения массива грунтов, а также тектонических нарушений, зон повышенной трещиноватости и обводненности [3]. Эти данные позволяют провести оценку напряженно-деформированного состояния среды. Решение подобных задач является важным для инженерной геологии, и для этого все чаще прибегают к использованию геомеханического моделирования [4–6], в частности к использованию упругопластической модели [7–9]. Такой подход поз-

воляет выделить зоны локализации пластических деформаций (зоны разрушений). Основная цель при этом не только построить модель, отвечающую существующему напряженному состоянию, но также осуществить контроль за состоянием среды.

Эти задачи особенно актуальны для областей со склонами, так как они могут создавать проблемы при градостроительном освоении этих территорий [10]. Помимо этого, большое значение имеют вопросы, связанные с наличием неоднородностей в среде выраженных разным составом грунтов и влиянием обводненных зон [11]. Все эти аспекты требуют учета в процессе построения модели и расчета ее деформирования.

Участок продления Дзержинской линии Новосибирского метрополитена электродепо «Волочаевское»

имеет два склона различной крутизны, поэтому необходимо контролировать их динамическое состояние и дать прогнозную оценку развития деформации грунта.

#### Методика работы

Одной из основных задач геомеханических исследований является получение оценок напряженно-деформированного состояния геологической среды и прогноз ее поведения в заданных условиях. В данной работе основное внимание уделено выявлению зон пластической деформации, которые представляют наибольшую опасность из-за развития в них необратимой деформации при изменении нагрузки, вызванной строительством и эксплуатацией сооружений.

Решение поставленной задачи осуществлялось при помощи численного моделирования, с использованием апробированного пакета компьютерных программ для решения двумерных геомеханических задач [9, 12–14].

Поведение среды описывалось в рамках модели Друккера–Прагера с неассоциированным законом течения [15, 16]. Согласно принятой модели, будем считать, что скорость деформации представляет сумму упругой и пластической (неупругой) частей. Соответственно, напряженное состояние среды рассчитывается из уравнения:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda(\theta - \theta^p)\delta_{ij} + 2\mu(d_{ij} - d_{ij}^p),$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – коэффициенты Ламе;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера. Компоненты тензоров скоростей деформаций  $d_{ij}$  определяются соотношениями Коши:

$$d_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \theta = d_{kk}.$$

Упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния:

$$f = \tau - \alpha p - Y,$$

где

$$\tau = \sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)/6}$$

– интенсивность касательных напряжений;  $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  – давление;  $\alpha$  и  $Y$  – параметры, которые могут быть выражены через коэффициенты внутреннего трения  $\varphi$  и сцепления  $C$  модели Кулона–Мора с помощью соотношений [15]:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}; Y = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}.$$

Рассматривалась задача о напряженно-деформированном состоянии горизонтально-слоистой среды со сложным рельефом под действием массовых гравитационных сил. Предполагалось, что слои лежат на жестком основании, на боковых границах отсутствуют горизонтальные смещения:  $u_x = 0$ .

Задача решалась в двумерной постановке для условий плоской деформации. Расчеты осуществлялись при помощи явной конечно-разностной схемы [17].

Для анализа напряженного состояния и оценки того, насколько состояние среды близко к критическому в момент, когда начинает развиваться необратимая

деформация и разрушение, в геомеханике широко используются кулоновские напряжения [18–20];  $\tau_c = T - tg(\varphi)\sigma$ . Как видно из соотношения, данный параметр представляет собой разность между касательными напряжениями на площадке и предельным трением. Соответственно, разрушение происходит при достижении параметром величины сцепления, а положительная величина данного параметра говорит о том, что касательные напряжения преодолевают трение в случае разрушения.

По аналогии введем параметр нормированных кулоновских напряжений, но для модели Друккера–Прагера:

$$F = (\tau - \alpha p)/Y.$$

Достижение данным параметром значения  $F = 1$  соответствует тому, что напряжения достигли предела упругости и в данной области возможно развитие пластической деформации и разрушение среды. Положительное значение данного параметра  $0 < F < 1$  означает, что сдвиговые напряжения превышают трение между частицами среды, но сцепление между ними не допускает развитие пластической деформации и среда остается в упругом состоянии. Однако, учитывая низкое сцепление грунта, такое состояние может быть потенциально опасным.

#### Геомеханическое моделирование

В работе проведена оценка напряженно-деформированного состояния расчетной области. Геометрия среды и ее механические свойства определялись на основе геофизических и петрофизических данных.

Предложена геомеханическая модель для геологического разреза, проходящего через район электродепо «Волочаевское». Его протяженность составила 1100 м и мощность 105 м (рис. 1). Все геомеханические параметры среды представлены в таблице. Они были получены на основе анализа данных бурения и петрофизических исследований.

Рассматриваемый район сложен осадочными породами, которые представлены различными фракциями. На основе данных о скоростях пробега продольных и поперечных волн и лабораторных измерений на керне, полученных в процессе бурения [21], было выделено три слоя с различными механическими свойствами (рис. 1, а). Первый слой представлен супесями с линзами и маломощными прослоями суглинков (таблица). Второй слой представлен алевролитами различных фракций, и третий – супесями пылевыми и песчаными с прослоями песка. Информация о четвертом слое отсутствует, он был введен с предположением о том, что он сложен песчаником. Данная модель позволила определить влияние рельефа и геометрии границ слоев на распределение напряженно-деформированного состояния, а также получить оценки развития необратимой деформации.

По данным электроразведки были выделены четыре зоны (геологические тела № 5–8, таблица) с различной величиной удельного электрического сопротивления, что объясняется составом пород и степенью обводне-

ности. По данным электроразведки и бурения участки 6 и 8 являются наиболее водонасыщенными начиная с глубины 5–7 м. В данных зонах было задано пониже-

ние значения коэффициента внутреннего трения до величин порядка 0,15–0,18 [21]. Модель среды с учетом этих зон представлена на рис. 1, б.

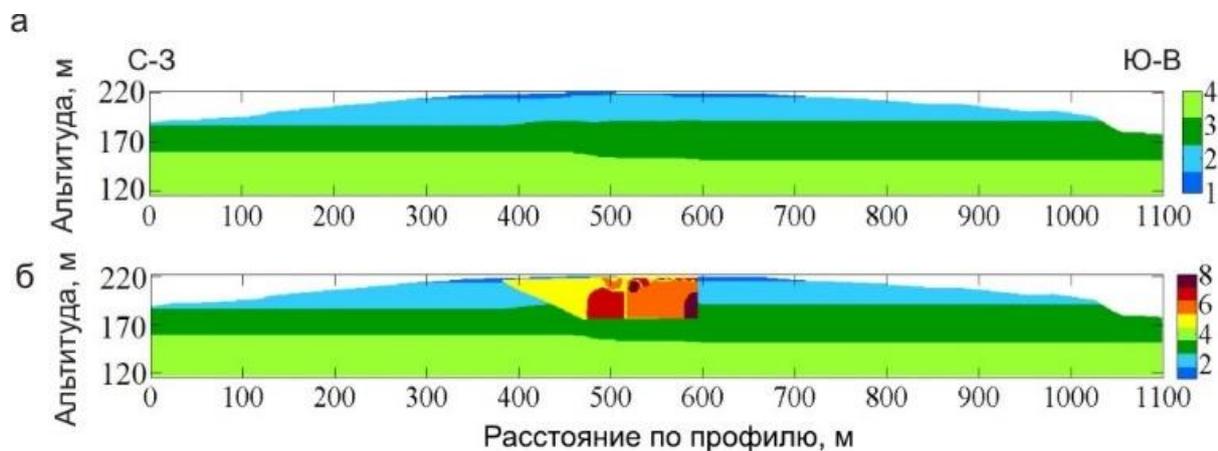


Рис. 1. Модели среды: а) по сейсмоплотностным данным; б) с учетом зон, выделенных на основе электропроводности среды и анализа керна. Показана цветовая шкала с нумерацией слоев, свойства которых приведены в таблице

Fig. 1. Environmental models: а) according to seismic density data; б) taking into account the zones identified on the basis of the electrical conductivity of the medium and core analysis. A color scale is shown with numbering of layers which properties are shown in Table

Таблица. Геомеханические параметры слоев

Table. Geomechanical parameters of layers

Геологические тела Geological body	Плотность, $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> ) Density (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ коэф. Пуассона Poisson's ratio	Модуль упру- гости, $E$ (МПа) Elastic modulus (MPa)	Параметр ды, $Y$ (МПа) Model ter, $Y$ (MPa)	Параметр среды, $\alpha$ Model parameter, $\alpha$	Состав Composition
1	1,79	0,31	207	0,018	0,21	Супеси с линзами и маломощными прослоями суглинков Sandy loam with lenses and thin layers of loam
2	1,98	0,28	292	0,027	0,2	Алевролиты разной фракции Aleurolites of different fractions
3	1,82	0,29	294	0,019	0,21	Супеси пылевые и песчаные с прослоями песка Sandy loam with sand
4	1,99	0,27	380	0,036	0,3	Песчаники Sandstone
5	1,98	0,28	292	0,024	0,18	Супеси с линзами и маломощными прослоями суглинков Sandy loam with lenses and thin layers of loam
6	1,98	0,28	292	0,018	0,16	Пластичные супеси Plastic sandy loam
7	1,98	0,28	292	0,017	0,17	Крупнозернистые алевролитовые разности Aleurolites of large fractions
8	1,98	0,28	292	0,015	0,15	Пластичные супеси Plastic sandy loam

В результате расчетов получены оценки устойчивости напряженно-деформированного состояния исследуемой модели среды. Для этого определены зоны, в которых возникает пластическая деформация. Кроме того, было рассчитано распределение нормированных кулоновских напряжений, которые отражают, насколько состояние среды близко к пластическому.

Результаты расчетов для модели, построенной только по сейсмоплотностным данным, показывают,

что значения параметра состояния  $F$ , близкое к 1, наблюдаются в двух областях (рис. 2). Первая из них расположена в центральной части профиля и прослеживается на всю глубину модели, что обусловлено наибольшей мощностью, а значит, и самыми высокими значениями напряжений, вызванных гравитационными силами. Вторая область с критическим значением параметра  $F$  располагается в зоне резкого изменения рельефа в северо-восточной части профиля, где

имеется наиболее крутой склон оврага. Резкие перепады напряжений в этой области приводят к неустойчивости рассматриваемого участка. Несмотря на высокие значения нормированных кулоновских напряжений, величина интенсивности сдвиговой пластической деформации остается малой и не превышает 0,02 %. В связи с этим можно предположить, что для данного участка может возникнуть небольшая усадка среды в центральной части разреза.

Второй вариант расчета напряженно-деформированного состояния с учетом аномалий, полученных методом электроразведки, показывает, что наличие участков обводнения (участки с пониженной прочностью) для модели не привело к существенным из-

менениям напряженно-деформированного состояния (рис. 3). Область, в которой нормированные кулоновские напряжения принимают значение  $F = 1$ , практически не изменилась по сравнению с результатом для слоистой модели (рис. 3, а). В то же время величина пластических деформаций возросла незначительно. В центральной части область пластической деформации, превышающая 0,02 %, расширилась (рис. 3, б), что может привести к большей усадке среды, чем в первом случае. Неизменной остается величина интенсивности сдвиговой пластической деформации на северо-восточной части профиля (борт склона).

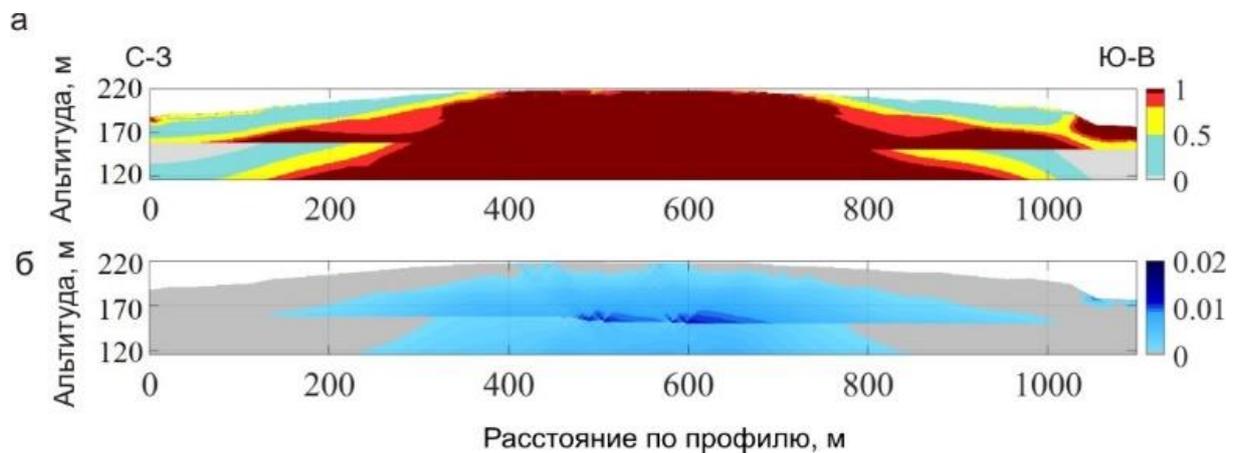


Рис. 2. Нормированные кулоновские напряжения (а) и интенсивность сдвиговых пластических деформаций (%) (б)  
Fig. 2. Normalized Coulomb stresses (a) and intensity of shear plastic deformations (%) (b)

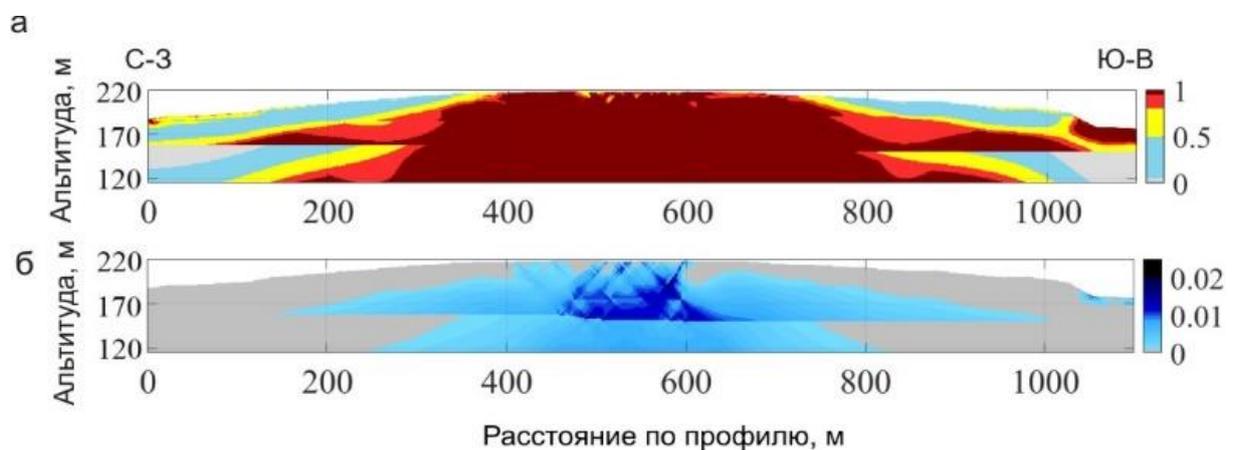


Рис. 3. Нормированные кулоновские напряжения (а) и интенсивность сдвиговых пластических деформаций (%) (б) с учетом аномалий, полученных методом электроразведки  
Fig. 3. Normalized Coulomb stresses (a) and intensity of shear plastic deformations (%) (b) taking into account anomalies obtained by the method of electrical exploration

#### Заключение

Таким образом, в результате анализа напряженно-деформированного состояния среды было установлено, что наибольшую опасность могут представлять зоны резкого изменения рельефа (в нашем случае при угле  $30^\circ$ ), что приводит к неоднородному распределению напряжений. Это может служить причиной обрушений и неустойчивости среды. В связи с не-

большими изменениями рельефа поверхности при деформации среды под собственным весом можно говорить об устойчивости района размещения электродепо «Волочаевское» и рекомендовать укрепить области с резкими перепадами рельефа для предупреждения возможных разрушений. Учет неоднородностей с пониженной прочностью не привел к значительным изменениям напряженно-деформированного

состояния в среде, хотя интенсивность пластической деформации достигла несколько большего значения. Это может привести к большей усадке среды, чем в случае рассмотренной нами слоистой среды.

*Исследование выполнено при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0006 «Структуры и напряженно-*

*деформированное состояние земной коры платформенных и складчатых областей Центральной Азии на основе совместного решения обратных задач сейсмологии и гравиметрии» и проекта РФФИ и Министерства образования, науки и инновационной политики Новосибирской области № 17-45-540528.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ причин аварий зданий и сооружений и пути повышения их надежности / В.В. Леденев., В.Г. Однолько // Вестник ТГТУ. Машиностроение. Металлообработка. Строительство. – 2012. – Т. 18. – № 2. – С. 449–457.
2. Итоги изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород / Э.В. Калинин // Инженерная геология. – 2017. – № 6. – С. 58–64.
3. Осипов В.И. Крупномасштабное геологическое картирование территории г. Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2011. – № 3. – С. 195–197.
4. Фоменко И.К. Математическое моделирование напряженного состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2000. – 92 с.
5. Фоменко И.К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов // Инженерная геология. – 2012. – № 6. – С. 44–53.
6. Wang X., Wang H., Liang R.Y. A method for slope stability analysis considering subsurface stratigraphic uncertainty // Landslides. – 2018. – V. 15. – № 5. – P. 925–936.
7. Elasto-plastic modeling of soft soil considering degradation of stiffness / H. Zhang, Q. Chen, J. Chen, J. Wang // Journal of Shanghai Jiaotong University. – 2015. – V. 20. – № 6. – P. 683–689.
8. A review of basic soil constitutive model for geotechnical application / S.T. Kok, B.H.H. Bujang, N. Jamaluddin, S.J. Moh'd, S.S. Gue // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2009. – V. 14J. – P. 1–18.
9. Геомеханические условия роста Тянь-Шаня и Алтая / В.Д. Суворов, Ю.П. Стефанов, Е.В. Павлов, Е.А. Мельник, А.А. Татаурова, В.А. Кочнев // Доклады РАН. – 2017. – Т. 476. – № 5. – С. 562–566.
10. Zhu D., Griffiths D.V., Fentons G.A. Probabilistic stability analyses of layered excavated slopes // Geotechnique Letters. – 2019. – V. 9. – № 3. – P. 1–4.
11. Chen Y., Marinelli F., Buscamera G. Mathematical interpretation of delayed instability in viscous unsaturated soil // Geotechnique Letters. – 2019. – V. 9. – № 3. – P. 1–8.
12. Стефанов Ю.П. Локализация деформаций и нарушений в геоматериалах. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 107–118.
13. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 3. – С. 129–142.
14. Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А., Формирование цветковых структур нарушений в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 81–93.
15. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics. – 1952. – V. 10. – № 2. – P. 157–165.
16. Nikolaevskii V.N. Governing equations of plastic deformation of a granular medium // J. Appl. Math. Mech. – 1971. – V. 35. – № 6. – P. 1017–1029.
17. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer Verlag, 1999. – 246 p.
18. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и области триггерного механизма возникновения землетрясений // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т. 10. – № 1. – С. 25–37.
19. Cocco M., Rice J.R. Pore pressure and poroelasticity effects in Coulomb stress analysis of earthquake interactions // JGR Solid Earth. – 2002. – V. 107. – № B2. – P. ESE 2-1–ESE 2-17.
20. Evaluating models of Coulomb stress transfer: Is variable fault geometry important? / Z.K. Mildon, S. Toda, J. Walker, G. Roberts // Geophysical Research Letters. – 2016. – V. 43. – № 24. – P. 12,407–12,414.
21. Изучение структурных и вещественных особенностей грунтов по комплексу сейсмоплотностных и геоэлектрических данных / Е.А. Мельник, А.А. Татаурова, В.В. Оленченко, В.Н. Глинских // Естественные и технические науки. – 2019. – № 2. – С. 66–70.

*Поступила 12.03.2020 г.*

#### Информация об авторах

**Татаурова А.А.**, научный сотрудник Лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Мельник Е.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая Лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Стефанов Ю.П.**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 624.131.3

## EVALUATION OF SOIL STABILITY BY NUMERICAL MODELING

Antonina A. Tataurova<sup>1</sup>,  
TataurovaAA@ipgg.sbras.ru

Elena A. Melnik<sup>1</sup>,  
MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Yurii P. Stefanov<sup>1</sup>,  
yu\_st@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance of the research.** The construction of industrial facilities in areas with difficult relief and geological structure requires calculations of the stress-strain state in order to obtain estimates of the zones of irreversible deformation development. This problem can be solved using numerical modeling. In this paper, we consider a section of the planned construction of the Volochoevskoe electric depot of the Dzerzhinsky line of the Novosibirsk subway. The difficult relief and low strength characteristics of the construction zone require special attention to assess of the soil bearing capacity and the slopes stability of closely located ravines. Numerical modeling is used to assess the stress-strain state of the medium using geophysical data on the structure and mechanical properties. These data provided information on stress concentration zones and the possible development of irreversible deformation.

**The main aim** of the research is to determine the stress-strain state and evaluate the stability of the upper part of the geological section using petrophysical and geophysical data obtained by seismic and electrical exploration.

**The object:** geological section along the extension section of the Dzerzhinsky line of the Novosibirsk subway of the Volochoevskoe electric depot.

**Methods.** Numerical modeling is used to calculate the stress-strain state in the construction zone. The problem is solved in an elasto-plastic setting. Geometric and geomechanical parameters of the environment are obtained in the analysis of petrophysical and geophysical data.

**Result.** The paper considers the section of the medium crossing the construction site of the electric depot «Volochoevskoye» of the Dzerzhinsky line of the Novosibirsk subway. Two geomechanical models are introduced: the first horizontally layered built on the basis of seismic data, the second is more complex, it includes data on heterogeneities found on the basis of the electrical resistivity distribution. The study area is characterized by a general deformation associated with zones of reduced strength. They are found in a complex analysis of electrical exploration and petrophysics. The stress-strain state does not significantly change taking into account these zones. Localization zones of irreversible deformation and fracturing can be formed in the upper part of the earth's crust. It was established that zones with a sharp difference in relief represent the greatest danger and will be destroyed first.

**Key words:**

Geomechanics, numerical modeling, stress-strain state, deformation, fracture, geophysical research, Novosibirsk.

The research was supported by the FSR project no. 0331-2019-0006 «Structures and stress-strain state of the earth's crust of platforms and folded areas of Central Asia based on joint solution of inverse problems of seismology and gravimeter» and the RFBR project and the Ministry of Education, Science and Innovation policy of Novosibirsk region no. 17-45-540528.

## REFERENCES

- Ledenev V.V., Odnolko V.G. The analysis of causes of accidents of buildings and structures and ways to improve their reliability. *Transactions TGTU*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 449–457. In Rus.
- Kalinin E.V. The results of the study stress-strain state of rock massifs. *Engineering Geology World*, 2017, no. 6, pp. 58–64. In Rus.
- Osipov V.I. Krupnomasshtabnoe geologicheskoe kartirovanie territorii g. Moskvy [Large-scale geological mapping of the Moscow territory]. *Environmental Geoscience*, 2011, no. 3, pp. 195–197.
- Fomenko I.K. *Matematicheskoe modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya inzhenerno-geologicheskogo massiva, slozhnogo anizotropnymi gornymi porodami*. Diss. Kand. nauk. [Mathematical modeling of the stress state of an engineering-geological massif composed of anisotropic rocks. Cand. Diss.]. Moscow, 2000. 92 p.
- Fomenko I.K. Current trends in slope stability calculations. *Engineering Geology World*, 2012, no.6, pp. 44–53. In Rus.
- Wang X., Wang H., Liang R.Y. A method for slope stability analysis considering subsurface stratigraphic uncertainty. *Landslides*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 925–936.
- Zhang H., Chen Q., Chen J., Wang J. Elasto-plastic modeling of soft soil considering degradation of stiffness. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2015, vol. 20, no. 6, pp. 683–689.
- Kok S.T., Bujang B.H.H., Jamaluddin N., Moh'd S.J., Gue S.S. A review of basic soil constitutive model for geotechnical application. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, vol. 14J, pp. 1–18.
- Suvorov V.D., Stefanov Yu.P., Pavlov E.V., Melnik E.A., Tataurova A.A., Kochnev V.A. Geomekhanicheskiye usloviya rosta Tyan-Shanya i Altaya [Geomechanical conditions of the Tien Shan and Altai orogen]. *Doklady RAN*, 2017, vol. 476, no. 5, pp. 562–566.
- Zhu D., Griffiths D.V., Fentons G.A. Probabilistic stability analyses of layered excavated slopes. *Geotechnique Letters*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 1–4.
- Chen Y., Marinelli F., Buscamera G. Mathematical interpretation of delayed instability in viscous unsaturated soil. *Geotechnique Letters*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 1–8.
- Stefanov Yu.P. Lokalizatsiya deformatsiy i narusheniy v geomaterialakh. Chislennoe modelirovanie [Deformation localization and fracture in geomaterials. Numerical simulation]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2002, vol. 5, no. 5, pp. 107–118.

13. Stefanov Yu.P. Nekotorye osobennosti chislennogo modelirovaniya povedeniya uprugokhrupkoplastichnykh materialov [On some features of numerical simulation of the behavior of elastic-brittle-plastic materials]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2005, vol. 8, no. 3, pp. 129–142.
14. Stefanov Yu.P., Bakeev R.A. Formirovaniye tsvetkovykh struktur narusheniy v sloye geosredy pri razryvnom gorizontalmom sdvige osnovaniya [Formation of flower structures in a geological layer at a strike-slip displacement in the basement]. *Fizika Zemli*, 2015, no. 4, pp. 81–93.
15. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, vol. 10, no. 2, pp. 157–165.
16. Nikolaevskii V.N. Governing equations of plastic deformation of a granular medium. *J. Appl. Math. Mech.*, 1971, vol. 35, no. 6, pp. 1017–1029.
17. Wilkins M.L. *Computer simulation of dynamic phenomena*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag Publ., 1999. 246 p.
18. Rebetsky Yu.L. Tectonic stresses and zones of earthquake triggering. *Physical Mesomechanics*, 2007, vol. 10, no. 1, pp. 25–37. In Rus.
19. Cocco M., Rice J.R. Pore pressure and poroelasticity effects in Coulomb stress analysis of earthquake interactions. *JGR Solid Earth*, 2002, vol. 107, no. B2, pp. ESE 2-1–ESE 2-17.
20. Mildon Z.K., Toda S., Walker J., Roberts G. Evaluating models of Coulomb stress transfer: Is variable fault geometry important? *Geophysical Research Letters*, 2016, vol. 43, no. 24, pp. 12,407–12,414.
21. Melnik E.A., Tataurova A.A., Olenchenko V.V., Glinskikh V.N. Studying of structural and material features of soils according to complex of seismic, gravity and geoelectric data. *Natural and technical sciences*, 2019, no. 2, pp. 66–70. In Rus.

Received: 12 March 2020.

#### Information about the authors

**Antonina A. Tataurova**, researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Elena A. Melnik**, Cand Sc., head of the laboratory, Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Yurii P. Stefanov**, Dr. Sc., leading researcher, Institute Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

УДК 550.837

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ЗЕМЛЕ ПРИ ЗОНДИРОВАНИЯХ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Могилатов Владимир Сергеевич<sup>1</sup>,  
mvecs@ya.ru

Потапов Владимир Владимирович<sup>1</sup>,  
potapovvv@ipgg.sbras.ru

Захаркин Александр Кузьмич<sup>2</sup>,  
zaharkin@ngs.ru

Гурьев Владимир Андреевич<sup>1</sup>,  
gurevva@ya.ru

Шейн Александр Николаевич<sup>1</sup>,  
sheinan@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> ООО «Цикл Гео», Россия, 630102, г. Новосибирск, ул. Нижегородская, 24/1, оф. 78.

*В период с 8 по 15 июля 2018 года сотрудниками Лаборатории геоэлектрики ИНГГ СО РАН проводились полевые исследования в рамках гранта РФФИ № 17-05-00083 А. Исследования направлены на обнаружение и численную оценку эффекта Холла в геологических средах. Этот эффект должен очень слабо проявляться во всех сигналах электромагнитных зондирований. Комплекс электроразведочных методов был выбран в связи с методической эффективностью и относительной простотой выполнения работ. Задачи исследований: выбор участка работ; измерение четырьмя радиальными линиями MN сигналов зондирований становлением в ближней зоне для регистрации компоненты  $E_R$ , вызванной эффектом Холла; измерение линейной компоненты  $E_\varphi$  для контроля измерений.*

**Актуальность** исследования обусловлена в первую очередь тем, что гальваномагнитные эффекты (в т. ч. и эффект Холла), возникающие в скрещенных электрическом и магнитном полях, хорошо известны в физике, но не исследовались применительно к геологической среде – это значит, что данные эффекты пока неучтенным образом влияют на сигналы в геоэлектромагнитных зондированиях.

**Цель:** обнаружение эффекта Холла в геологических средах.

**Объект:** эффект Холла в геологической среде.

**Методы:** зондирование становлением поля в ближней зоне, магнитотеллурическое зондирование.

**Результаты.** Полевые исследования в 2018 г. являются первыми целенаправленными полевыми исследованиями с целью обнаружения эффекта Холла в геологической среде методами электромагнитных зондирований. Цель работ, по мнению самих исследователей, по предварительным данным, достигнута. Получена оценка холловской проводимости  $\sim 1\text{--}2 \cdot 10^{-3}$  См/м.

### **Ключевые слова:**

Электроразведка, зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), геомагнитное поле, эффект Холла, эффект Лоренца.

### **Введение**

Невозможно отрицать, что, в принципе, существует взаимодействие между токами, возникающими в геоэлектромагнитных полях, и магнитным полем Земли. Такое взаимодействие является важнейшим и безусловным физическим явлением, базирующимся на эффекте Лоренца. Проблема состоит только в установлении реального проявления этого фактора в геоэлектромагнитных зондированиях. Первоначальный анализ показывает, что это может проявляться в эффективной анизотропии проводимости горных пород, вызванной эффектом Холла. Под эффектом Холла в случае неограниченной среды будем понимать возникновение поперечной к току и магнитному полю Земли электродвижущей силы. Кроме того, в результате тенденции к криволинейной траектории но-

сителей тока под влиянием силы Лоренца возникает эффективная намагниченность, зависящая от состояния геосреды на микроуровне.

Эти гальваномагнитные эффекты, возникающие в скрещенных электрическом и магнитном полях, хорошо известны в физике [1–14], но не исследовались применительно к геологической среде. Мы исходим из того, что эти явления существуют и пока неучтенным образом влияют на сигналы в геоэлектромагнитных зондированиях. Более того, сами авторы вполне убеждены, что геомагнитные эффекты уже проявляли себя в некоторых ситуациях в электроразведочных исследованиях [15–19]. Однако наши предыдущие попытки публикаций, основанные больше на умозрительных построениях, были частично отвергнуты – рецензенты указывали, что эффекты, может быть, и

присутствуют, но в таком количестве, которое делает проблему несуществующей в геоэлектрике. То есть сначала надо зарегистрировать эффект в поле. Это, конечно, справедливо, и самая насущная и первая необходимость состоит, во-первых, в достоверном обнаружении этих эффектов, а во-вторых, в определении характерных параметров. При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований мы, наконец, смогли летом 2018 г. провести специальные полевые эксперименты в Новосибирской области. По нашему мнению, наиболее подходящей экспериментальной схемой являются зондирования становлением электромагнитного поля как наиболее чувствительный метод.

### Теоретические предпосылки

В работах [15–19] уже обсуждались некоторые факты электроразведки зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБ) и магнитотеллурических зондированиях (МТЗ), которые могут быть отнесены на счет влияния магнитного поля Земли, но сейчас мы хотели бы обосновать возможные специальные эксперименты с целью выяснения этого обстоятельства. Прежде всего, довольно понятно, что речь идет об эффекте Холла в геологической среде. Учитывая наличие силы Лоренца, можно формально представить первое уравнение Максвелла в виде

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma \cdot \mathbf{E} + \nu \cdot [\mathbf{j}, \mathbf{H}^\circ], \quad (1)$$

где  $\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}$  – плотность тока;  $\nu$  – коэффициент (в м/А), удовлетворяющий размерности и учитывающий способность среды к появлению холловского тока;  $\mathbf{H}^\circ$  – поле Земли. Перепишем (1) как

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma \cdot \mathbf{E} + \sigma \cdot \nu \cdot \mathbf{H}^\circ \cdot [\mathbf{E}, \mathbf{e}^\circ], \quad (2)$$

здесь  $\mathbf{e}^\circ$  – единичный вектор в направлении земного поля.

Теперь мы видим, что дополнительная холловская проводимость  $\sigma_H = \sigma \cdot \nu \cdot \mathbf{H}^\circ$  складывается из различных факторов. Отчасти она присуща среде и связана (посредством коэффициента  $\nu$ ) с такими характеристиками среды на микроуровне, как подвижность и тип носителей тока, длина свободного пробега, поровое пространство, флюид и прочее. Холловская проводимость также пропорциональна обычной проводимости и напряженности земного поля. И есть еще переменный фактор – конфигурация токов по отношению к направлению поля Земли. Эту ситуацию можно описать эффективной тензорной проводимостью (холловской анизотропией).

Рассмотрим наиболее простую ситуацию – процесс становления от горизонтальной токовой петли в горизонтально-слоистой среде. Решение хорошо известно (например, [11]). Поле осесимметрично и в цилиндрической системе координат имеет магнитные компоненты  $H_r, H_z$  и единственную электрическую –  $E_\varphi$ . Примем, что магнитное поле Земли вертикально. Тогда из уравнения (2), раскрывая векторное произведение, получим, что появляется радиальная плотность тока

$$j_r = \sigma_H \cdot E_\varphi = \sigma \cdot \nu \cdot \mathbf{H}^\circ \cdot E_\varphi \quad (3)$$

и, как следует из (3), радиальная электрическая компонента (рис. 1)

$$E_r = \nu \cdot \mathbf{H}^\circ \cdot E_\varphi \equiv \frac{\sigma_H}{\sigma} \cdot E_\varphi. \quad (4)$$

Зная параметр  $\nu$ , можно проводить прямое моделирование процессов становления с учетом геомагнитного фактора. Параметр  $\nu$  можно связать с подвижностью носителей тока ( $\mu$ ) и с коэффициентом Холла ( $R_H$ ), которые определены для некоторых материалов и меняются в широких пределах. Проблема, однако, в том, что это не имеет отношения к геологической среде. В этом смысле мы о ней не знаем ничего. Собственно, мы и предлагаем способ экспериментального определения параметров эффекта Холла в геологической среде.



Рис. 1. Появление холловской напряженности  $E_r$  электрического поля

Fig. 1. Hall electric field intensity  $E_r$  appearance

Как показывает формула (4), применяя токовую петлю и измеряя радиальной линией разность потенциалов

$$\Delta U = \nu \cdot \mathbf{H}^\circ \cdot \int_{r_2}^{r_1} E_\varphi(r) dr, \quad (5)$$

где, в первом приближении, функция  $E_\varphi$  есть хорошо известное решение для горизонтально-слоистой среды без учета геомагнитного фактора, мы можем рассчитать коэффициент  $\nu$ , который и определяет геомагнитный эффект в любом методе ЗС.

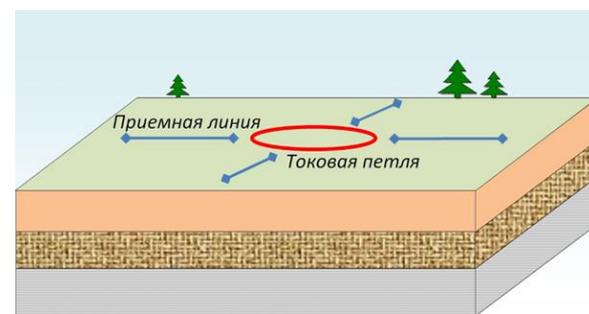


Рис. 2. Схема определения холловской проводимости в методе зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБ)

Fig. 2. Hall conductivity determination scheme in transient electromagnetic method (TEM)

Таким образом, предлагается простая экспериментальная схема (рис. 2). На выбранном участке с ровной поверхностью и горизонтально-слоистым разре-

зом (насколько это известно) располагается источник – токовая петля с импульсным возбуждением. Процесс становления регистрируется радиальной приемной линией при четырех одинаковых ее положениях относительно петли. Установка должна быть большой, как для структурных исследований. Желательно также перемещать и поворачивать всю расстановку и повторять измерения. Мы должны выявить одинаковую компоненту сигнала во всех четырех измерениях, если она не проявится явно. Все зависит от величины  $\sigma_H$ .

#### Место проведения экспериментов

Заранее понятно, что эффект Холла для геологических сред слаб. Для его обнаружения, прежде всего, необходимо устранить влияние нормального поля токовой петли, что мы, в принципе, делаем, применяя специфическую схему измерений (токовая петля и радиальные измерительные линии) и что, однако, ставит нас в весьма уязвимую позицию метода чистой аномалии. Поэтому необходимо добиться минимизации влияния всех факторов, которые могут исказить искомый сигнал. Основными факторами являются: наличие электромагнитных помех, локальные неоднородности в среде, горизонтально-неоднородная структура среды в районе эксперимента, нарушение

параметров генераторно-измерительного комплекса (расстановка на местности петель и линий).

Все факторы (и даже последний, геометрический) искажения сигнала напрямую зависят от места исследований. Для устранения искажений нужно было выбрать участок работ со следующими условиями:

- 1) горизонтально-слоистая среда (исключение влияния латеральных неоднородностей на сигналы);
- 2) удаленность от промышленных объектов и населенных пунктов (уменьшение уровня электромагнитных помех);
- 3) ровная по рельефу и незалесенная местность (отсутствие искажений в сигнале из-за рельефа и возможность максимально точно расположить генераторно-измерительный комплекс на местности).

После рекогносцировочных выездов было выбрано место в Татарском районе Новосибирской области недалеко от поселка Орловка. Местность характеризуется ровным рельефом (рис. 3). По априорным данным предыдущих геологических и геофизических исследований район работ очень близок к горизонтально-слоистому разрезу. Ближайший поселок удален на расстояние 5 км и вблизи нет никаких промышленных объектов и высоковольтных ЛЭП. Таким образом, все необходимые условия для успешного решения поставленных задач могут быть выполнены.

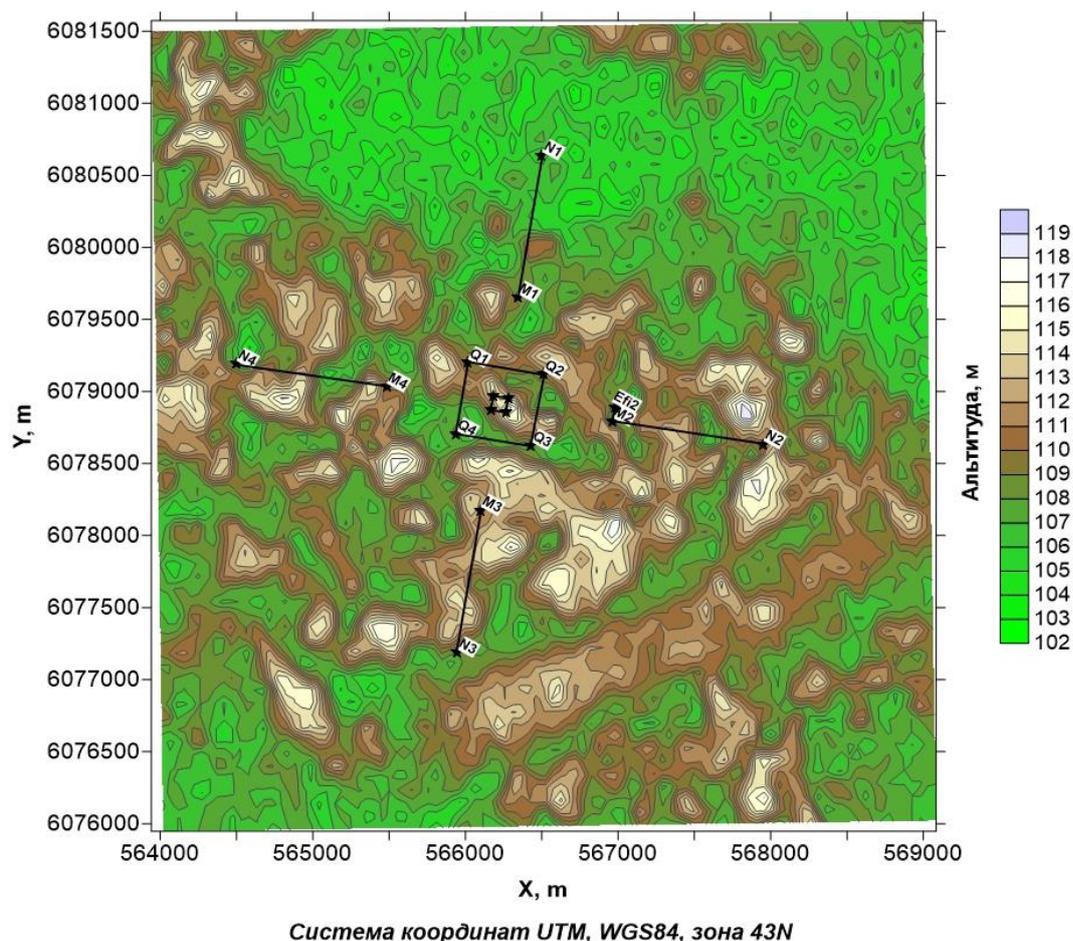


Рис. 3. Рельеф местности в районе исследований (построено по данным SRTM) и расположение на местности элементов экспериментальной установки

Fig. 3. Study area terrain (based on the SRTM) and experimental installation elements ground location

Поверхность Татарского района – типичная равнина со сглаженным гривным характером. Абсолютные высоты колеблются в пределах 106–113 м над уровнем моря, а пологие возвышенности чередуются с плавными понижениями (рис. 3). Довольно много блюдцеобразных западин, которые заняты озёрами и болотами. Под болотами занято 7 % территории района.

Татарская разведочная площадь расположена в южной части Западно-Сибирской низменности в пределах Обь-Иртышской впадины. Вблизи выбранного участка ранее проводился комплекс работ, включающий электроразведочные, сейсмические и гравиметрические измерения. Отчеты по этим работам были нами проанализированы с целью подтверждения горизонтально-слоистого строения выбранного участка.

Так, в отчете Барабинской экспедиции за 1948 г. «Геофизические исследования в центральной части Западно-Сибирской низменности» представлен сводный разрез по данным сейсмических и электроразведочных работ, проходящий в направлении Татарск–Барабинск. Разрез вполне горизонтально-слоистый (отражающие горизонты на глубине 500 и 1000 м в мезозойское являются пологозалегающими) вплоть до появления отражающего горизонта в палеозое на глубине 2200 м. Таким образом, мы можем предположить, что в районе проведения работ среда является горизонтально-слоистой, с пологозалегающими горизонтами вплоть до глубины 2200 м.

Схематический геологический профиль через Татарскую площадь, представленный в отчете по Татарской буровой партии, также показывает горизонтально-слоистый характер среды (рис. 4).

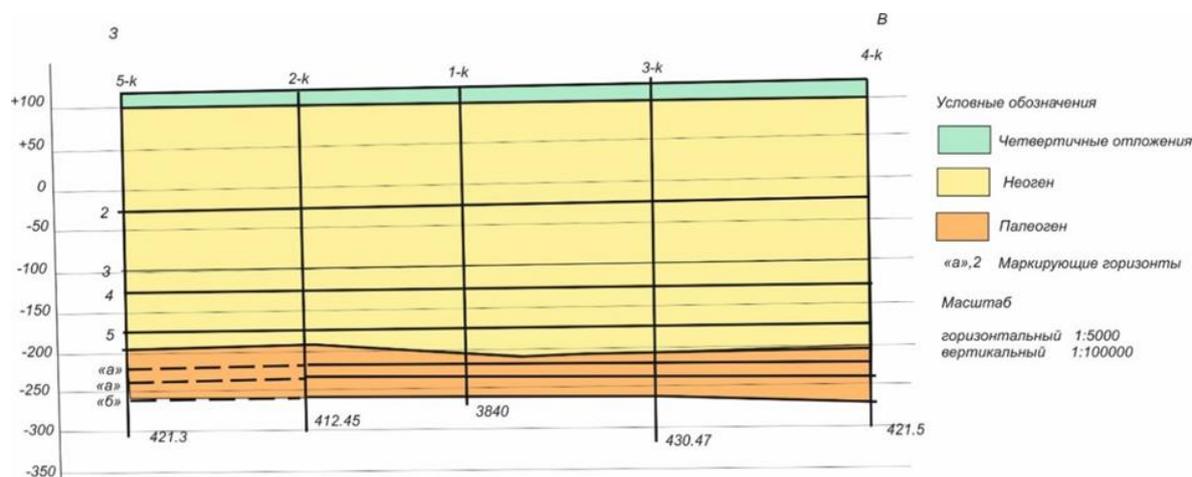


Рис. 4. Схематический геологический профиль через Татарскую площадь

Fig. 4. Schematic geologic profile across the Tatar area

Нами также были проанализированы кривые вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) Барабинской геофизической экспедиции, полученные вблизи г. Татарска. Ближайшие точки ВЭЗ (57, 58) находятся в 35 км к северо-востоку от участка исследований.

Следует добавить, что в рамках эксперимента были сделаны магнитотеллурические зондирования. Результаты МТЗ с точки зрения эффекта Холла будут обсуждаться в другой статье, однако они, между прочим, подтвердили горизонтально-слоистый характер разреза.

В результате, проинтерпретировав кривые ВЭЗ и МТЗ, а также сейсмические и гравиметрические данные, и детально изучив верхнюю часть разреза до глубины 2200 м вблизи участка исследований, можно сделать вывод о наличии нескольких слоев, практически субпараллельных друг другу, без резких вертикальных границ и с уверенностью говорить о горизонтально-слоистом характере среды на выбранном участке.

#### Расположение элементов экспериментальной установки

Схема расположения всех линий и генераторной петли показана на рис. 3. Видны порядковые номера линий MN и как они расположены относительно сторон света и центра генераторной петли. Генераторная

петля располагалась на ровной поверхности из провода марки ГПМП размером 500×500 м. Общее сопротивление петли было 8,6 Ом. Схема измерений 2018 г. состояла из следующих компонентов:

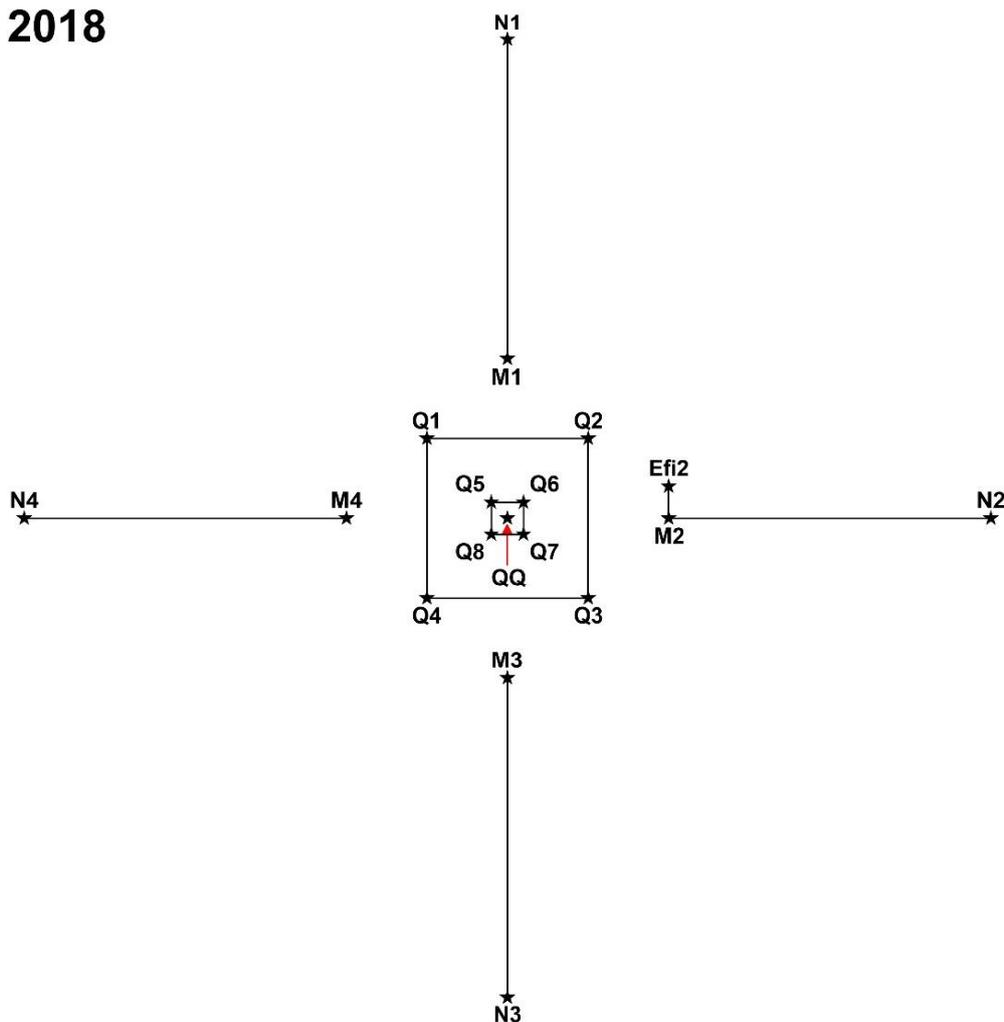
- 1) QQ – центр установки МТЗ, а также генераторной и измерительной петлей ЗСБ;
- 2) Q1Q2Q3Q4 – генераторная петля ЗСБ (500×500 м);
- 3) Q5Q6Q7Q8 – измерительная петля ЗСБ (100×100 м);
- 4) M1N1, M2N2, M3N3, M4N4 – измерительные линии ЗСБ (1 км) для регистрации компоненты  $E_R$ ;
- 5) M2Efi2 – измерительная линия ЗСБ (100 м) для регистрации компоненты  $E_\phi$ .

Таблица 1. Координаты элементов экспериментальной установки

Table 1. Experimental installation elements coordinates

Элемент установки Installation element	Координата Coordinate		Элемент установки Installation element	Координата Coordinate	
	X	Y		X	Y
QQ	566223	6078912	M2	566963	6078791
Q1	566015	6079198	M3	566101	6078173
Q2	566508	6079118	M4	565483	6079030
Q3	566429	6078625	N1	566499	6080638
Q4	565936	6078705	N2	567949	6078633
Efi	566979	6078890	N3	565941	6077186
M1	566340	6079651	N4	564496	6079189

2018



**Рис. 5.** Схема расположения на местности элементов экспериментальной установки  
**Fig. 5.** Experimental installation elements ground location scheme

Все приемные линии располагались радиально, одинаково по отношению к петле и заземлялись свинцовыми неполяризуемыми электродами на расстоянии от центра 750 и 1750 м. Для соединения заземлений использовался телефонный сталемедный провод длиной 1000 м.

Расположение всех проводов на местности осуществлялось с использованием навигатора Garmin-64st, который обеспечивает точность позиционирования 1 м, поскольку работает с использованием как спутников GPS, так и спутников Глонасс и при соблюдении некоторых условий. Поскольку местность проведения работ открытая и слабозалесенная, то во время проведения работ количество одновременно видимых спутников было не менее 10, что также обеспечивало высокую точность позиционирования. Помимо использования навигатора все расстановки петель и линий MN контролировались вешками так, чтобы несколько вешек вдоль прокладки провода были видны и составляли одну линию. Таким образом, можно еще раз сказать, что максимальное отклонение расстановки петель и линий относительно запланированного не более 1 м. Угол расстановки петель и линий относительно направления на истинный

север составил  $10^\circ$  и был выбран из соображений максимальной прямой видимости и отсутствия залесенности вдоль линий и сторон петель для более точного расположения на местности.

Кроме основных измерений (источник – петля, и 4 измерительных линии MN) предусматривались важные дополнительные измерения соосной установкой ЗСБ. Измерительная петля для соосных измерений размером  $100 \times 100$  м располагалась в центре генераторной петли и под тем же углом к сторонам света, что и измерительная. Кроме того, в точке M2 (750 м от центра петли) производилось измерение электрической компоненты  $E_\varphi$  посредством стометровой заземленной линии, параллельной стороне генераторной петли и перпендикулярно линии MN2. Значение этих дополнительных измерений мы поясним ниже.

На рис. 6 показан перепад высот на всех линиях и периметре генераторной петли. Самый большой перепад составил 6 м на общую длину 1000 м, что составляет менее половины градуса наклона линий. Таким образом, можно считать, что рельеф вносит очень малые искажения в сигналы ЗСБ, полученные в ходе исследований.

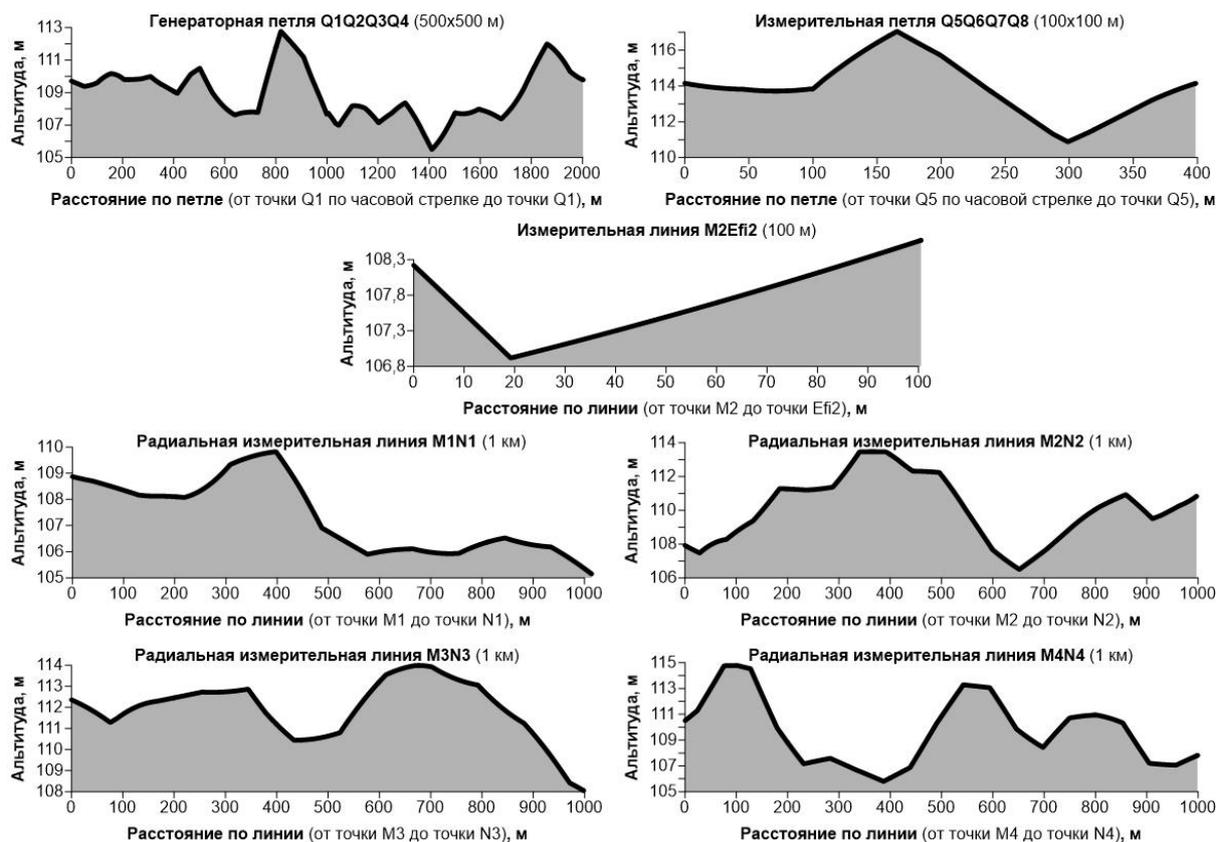


Рис. 6. Перепад высот на всех линиях MN и на периметре генераторной петли

Fig. 6. Height difference on all MN lines and on the generator loop perimeter

#### Аппаратура

Измерения методом ЗСБ осуществлялись двумя типами измерительной аппаратуры:

1. «Цикл-7» [20];
2. «FastSnap» [21].

Технические характеристики измерительных комплексов описаны по указанным ссылкам, но можно сказать, что это современные комплекты аппаратуры, позволяющие качественно измерять сигналы ЗСБ.

В качестве генераторной группы выступал коммутатор тока «Цикл-Т50» и блок управления коммутатором тока того же производства [20]. Синхронизация измерений осуществлялась посредством GPS.

Источником питания выступали автомобильные аккумуляторы, соединенные последовательно в количестве 9 штук, что обеспечивало ток в генераторной петле 11,5–12,5 А.

Для проведения измерений методом МТЗ использовалась стандартная аппаратура «MTU-5» фирмы Phoenix Geophysics (Канада) [22]. Аппаратура позволяет измерять на частотах от 300 до 0,0001 Гц.

#### Вспомогательные и основные исследования

Безусловно, основные измерения – переходный сигнал в электрических радиальных линиях при возбуждении импульсами тока в незаземленной петле – должны быть дополнены или предваряться различными стандартными геоэлектромантными экспериментами с целью изучения геоэлектрического разреза

для дальнейшего анализа и численного моделирования. Это даст инструменты для оценки качества измерений и оценки искомых сигналов, относящихся, предположительно, к проявлению эффекта Холла.

Прежде всего, с помощью подготовленной для основного эксперимента генераторной петли (500×500 м) и приемной петли (100×100 м) были произведены соосные сигналы ЗСБ. Это наиболее надежная методика зондирования становлением, результаты которой хорошо интерпретируются и позволяют установить одномерный геоэлектрический разрез. Были произведены регистрации процесса становления двумя измерителями – «Цикл-7» и «FastSnap», которые дали одинаковый результат. На рис. 7 представлена полевая кривая (аппаратура «Цикл-7») и теоретическая кривая для подобранной одномерной среды.

Таким образом, мы получили как результат интерпретации соосных сигналов ЗСБ следующую одномерную геоэлектрическую модель среды (табл. 2):

Таблица 2. Одномерный геоэлектрический разрез по данным ЗСБ

Table 2. 1D geoelectric section according to TEM method

Слой № Layer no.	Удельное электрическое сопротивление (УЭС), Ом·м Electrical resistivity (ER), Ohm·m	Мощность, м Thickness, m
1	10	24
2	7	357
3	4	791
4	15	∞

Мы должны понимать, что это одна из эквивалентных моделей даже в рамках ЗСБ. Другие геоэлектрические методы (МТЗ, ВЭЗ) могут показывать заметно отличающиеся параметры модели среды.

Основные измерения предполагалось производить с заземленных линий. Вообще, измерение электрических (с заземленных линий) сигналов в зондированиях становлением по сравнению с измерениями ЭДС от индуктивных датчиков имеет несколько проблем и становится менее надежным. Возникают трудности с заземлениями (электродами), с влиянием вызванной поляризации. Еще можно отметить специфические электромагнитные помехи и сложности с тестированием

измерителя. В нашем случае проблема усложняется неопределенностью и слабостью предполагаемых сигналов. Поэтому необходимо было проверить электрические измерения. Это можно сделать, если измерить нормальную, «штатную», компоненту устанавливающегося поля токовой петли, а именно компоненту  $E_{\varphi}$ .

Применим следующую процедуру контроля. Для среды, полученной как результат интерпретации соосных ЗСБ (табл. 2), мы можем рассчитать сигнал для короткой приемной электрической линии, перпендикулярной основной линии MN2 (рис. 5). Теперь сравним расчет с измеренным на практике сигналом.

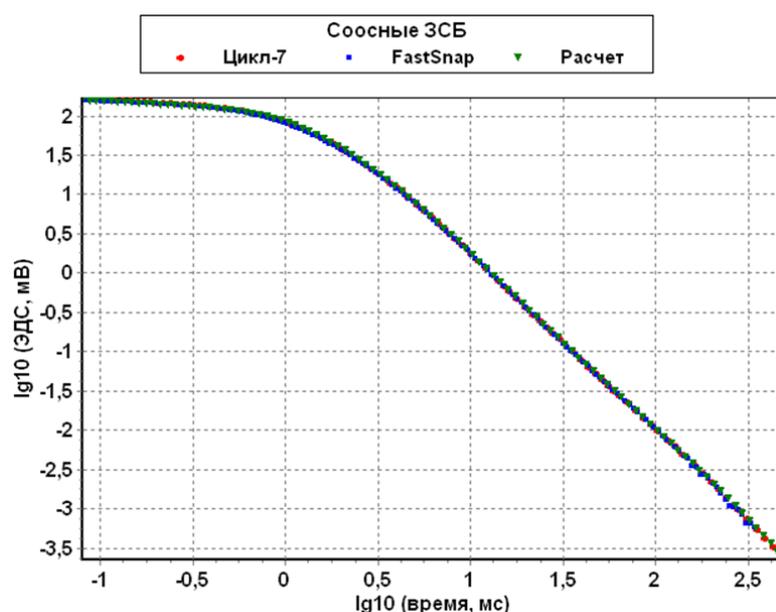


Рис. 7. Измеренная кривая соосных зондирований и теоретическая кривая для выбранного разреза  
Fig. 7. Measured coaxial sounding curve and theoretical curve for the selected section

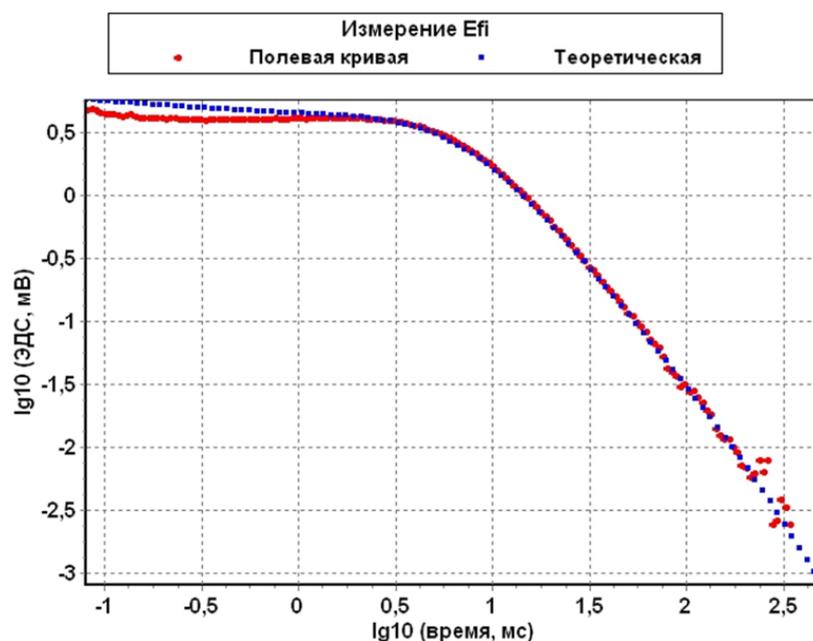


Рис. 8. Сравнение полевого и рассчитанного сигнала  $E_{\varphi}$   
Fig. 8. Comparison between field and calculated signal  $E_{\varphi}$

На рис. 8 показано это сравнение. Считаем, что это весьма удовлетворительный результат, подтверждающий адекватность наших электрических (от заземленных линий) измерений. Более того, мы подтвердили также интерпретацию сигнала ЗСБ как сигнала в одномерной среде именно с определенными выше параметрами, поскольку используем теперь сигналы (полевой и теоретический) на значительном удалении от центра петли (750 м). Не лишне также заметить, что не обнаруживается влияние других факторов, прежде всего, вызванной поляризации (ВП). Конечно, можно заметить расхождение на ранних временах. Может быть, нужно уточнить одномерную структуру верхней части разреза (ВЧР). Не исключено влияние небольших приповерхностных неоднородностей.

Анализ геолого-геофизической информации и вспомогательных зондирований, приведенный выше, показал, что мы действительно располагаемся на поверхности горизонтально-слоистой среды с определенными нами геоэлектрическими параметрами, и наши измерители сигналов с приемных заземленных линий адекватно на них реагируют. Рассмотрим, учитывая это, наши основные измерения.

Расположение элементов генераторно-измерительного комплекса приведено на рис. 3, 5 и в табл. 1. Данные о рельефе и точности расстановки мы также привели выше. Итак, нами были произведены измерения переходного сигнала с четырех радиальных линий от квадратной петли 500×500 м. Все линии расположены одинаково по отношению к петле и заземлялись на расстоянии от центра 750 и 1750 м. Абсолютно понятно, что мы хотели сопоставить сигналы всех четырех линий. По приведенным выше теоретическим представлениям, если магнитное поле считать вертикальным, сигналы должны совпадать. Все другие факторы – неоднородности, неточности в геометрии, дадут совершенно различные сигналы в разнонаправленных линиях. Конечно, имеется небольшая горизонтальная компонента магнитного поля Земли, но она слабо повлияет на сигналы горизонтальных приемных линий.

Итак, на рис. 9 приведены устанавливающиеся сигналы со всех четырех линий (в логарифмическом масштабе). К сожалению, в течение работ резко ухудшалась погода (шторм, гроза, ливни), а наши временные и финансовые ресурсы были ограничены. Так что качество измерений далеко не однородно.

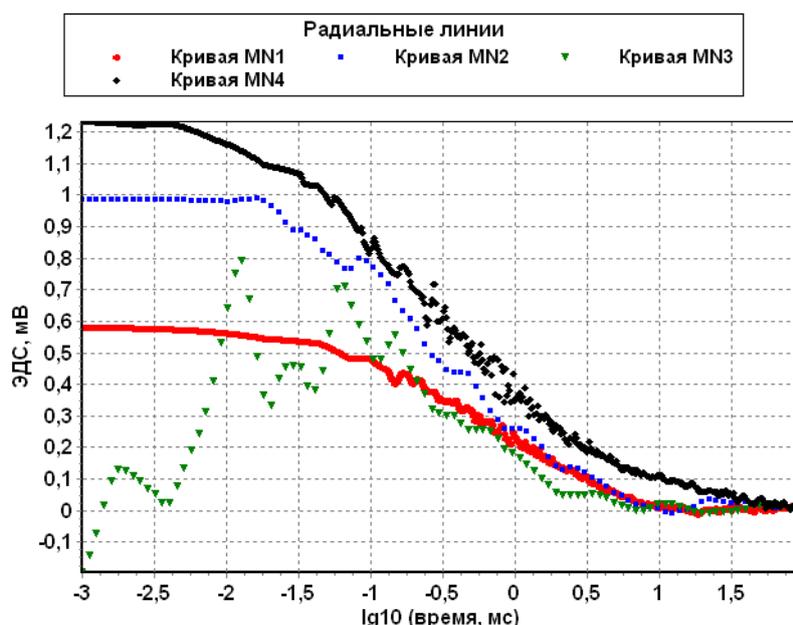


Рис. 9. Сигналы с четырех линий после обработки

Fig. 9. Four lines signals after preprocessing

Тем не менее мы склонны видеть в этих сигналах общую основу и оцениваем этот результат как положительный. Все-таки, мы имеем со всех линий примерно одинаковый сигнал, довольно определенный и не малый (около 0,5 мВ при токе в петле 12 А), что позволяет говорить о регистрации эффекта Холла в геологической среде. Выше мы описывали наши мероприятия для минимизации влияния латеральных неоднородностей среды (посредством тщательного выбора места проведения эксперимента) и искажений геометрии установки. Но если бы этих мероприятий оказалось недостаточно, то сигналы за счет этих факторов оказались бы совершенно различными, вклю-

чая и смену полярности, поскольку мы провели измерения в четырех различных направлениях. Мы моделировали влияние некоторых нарушений геометрии (первые метры) и получали значительные сигналы в линиях, но они были совершенно различны. Только искомый эффект может дать одинаковые сигналы в четырех радиальных направлениях от токовой петли.

Есть еще дополнительные соображения по поводу того, что сигналы все-таки довольно существенно различаются. Полностью одинаковыми сигналы должны бы быть, если поле Земли вертикально. Однако это не так, есть еще горизонтальная составляющая, направленная, примерно, с севера на юг. При-

помним здесь конфигурацию вторичного тока от петли и свойства векторного произведения. Эта горизонтальная компонента никак не взаимодействует с токами в этом же направлении, т. е. слабо влияет на сигналы широтных линий (MN2 и MN4), но значительно влияет на токи в широтном направлении, над которыми располагаются линии MN1 и MN3. Вот мы и видим, что сигналы с линий 2 и 4 близки между собой, а сигнал с линии MN1 ослаблен. К сожалению, о линии 3 судить определенно трудно.

Наконец, сравним полевые сигналы с теоретическим сигналом вследствие эффекта Холла, рассчитанным по формуле (5). На рис. 10 приведено такое сравнение (теперь в билогарифмическом масштабе). Теоретическая кривая, рассчитанная для  $\sigma_H = 0,002$

См/м, в какой-то мере соответствует полевым кривым, и, таким образом, мы определили холловскую проводимость. На наш взгляд, мы положительным образом решили вопрос о проявлении эффекта Холла в электроразведке. Но, возможно, на взгляд читателя, результат не такой уж определенный. Хотя, странно было бы сразу получить абсолютно бесспорный факт, который долгое время не был замечен в электроразведке. Конечно же, это нуждается в подтверждении в дальнейших полевых исследованиях, поскольку холловский сигнал слаб, а измерения пока получились не самого лучшего возможного качества. В любом случае, мы не видим в результатах эксперимента ничего противоречащего нашей гипотезе о наблюдаемости эффекта Холла в электромагнитных зондированиях.

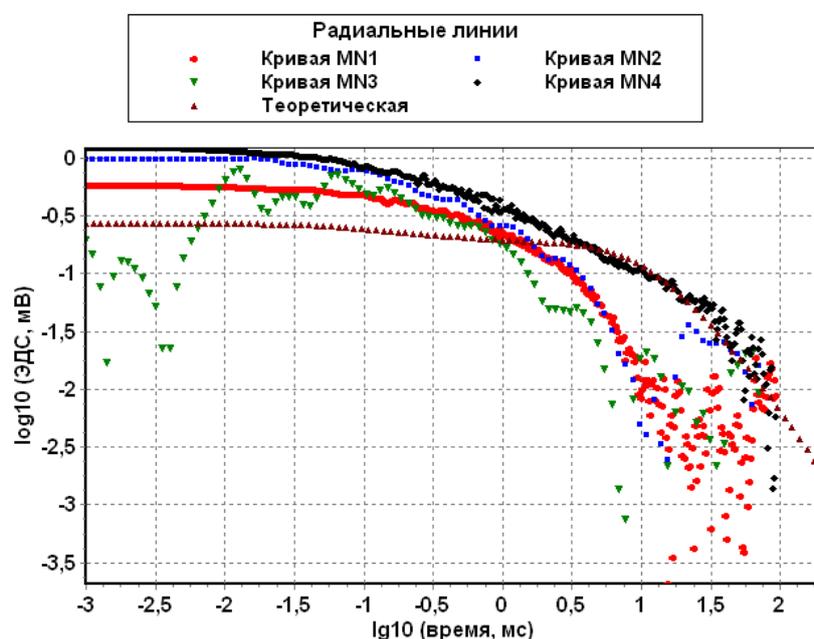


Рис. 10. Сравнение всех полевых сигналов с теоретическим для  $\sigma_H = 0,002$  См/м

Fig. 10. Comparison between all field signals and the theoretical one for  $\sigma_H = 0,002$  S/m

### Заключение

Проведены первые целенаправленные полевые исследования с целью обнаружения эффекта Холла в геологической среде, и эта цель, по предварительным данным и мнению самих исследователей, достигнута. Получена оценка холловской проводимости около  $2 \cdot 10^{-3}$  См/м. Однако мы понимаем, что обнаружение нового эффекта в геоэлектрике, его признание научной общественностью потребует дополнительных исследований и доказательств. Совершенно необходимо повторить измерения на том же участке со смещением и поворотом экспериментальной установки, а также увеличить объем дополнительных тестовых измерений. Необходимо добиться повышения качества измерений, и для этого явно есть возможности.

Как бы там ни было, значимость поднятой темы неоспорима, и тема эта будет, мы уверены, развиваться

ся. Следует только подчеркнуть ее важность и в практическом отношении. Эффект Холла позволяет ввести, по крайней мере, еще один новый геоэлектрический параметр. Этот параметр весьма тесно связан с вещественным составом среды. Конечно, определение этого параметра требует специальных электроразведочных методик, сигнал слаб. Например, использованная нами в описанной выше работе установка с токовой петлей и радиальными линиями – вынужденный по ресурсным соображениям выбор, который стал приемлемым только после тщательного выбора места и строгого выполнения геометрических требований. Нужны методики, где нормальный (от вмещающих пород) электродинамический фон отклика подавлен.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 17-05-00083.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hall E.H. On a new action of the magnet on electric currents // American Journal of Mathematics. – 1879. – V. 2. – P. 287–292.
2. Beer A.C. Hall effect and the beauty and challenges of science // The Hall Effect and its Applications. – New York: Plenum Press, 1980. – P. 299–338.
3. Allgaier R.S. Some general input-output rules governing Hall coefficient behavior // The Hall Effect and its Applications. – New York: Plenum Press, 1980. – P. 375–397.
4. Herring C. Effect of random inhomogeneities on electrical and galvanomagnetic measurements // Journal of Applied Physics. – 1960. – V. 31. – № 11. – P. 1939–1953.
5. Juretschke H.J., Landauer R., Swanson J.A. Hall effect and conductivity in porous media // Journal of Applied Physics. – 1956. – V. 27. – № 7. – P. 838–839.
6. Cohen M.H., Jortner J. Effective medium theory for the Hall effect in disordered materials // Physical Review Letters. – 1973. – V. 30. – № 15. – P. 696–698.
7. Lei Tan Fu, Leu Len-Yi, Lee Chung Len. Specific contact resistivity measurement by a vertical Kelvin test structure // Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions. – 1987. – V. ED-34. – № 6. – P. 1390–1395.
8. De Mey G. Hall effect in a non-homogeneous magnetic field // Solid State Electron. – 1977. – V. 20. – № 2. – P. 139–142.
9. Komiyama S. A capacitive method for Hall effect measurement // Journal of Applied Physics. – 1981. – V. 25. – № 3. – P. 303–305.
10. Oswald J., Feichtinger H., Czupata R. A useful method to improve convergence in least-squares fitting procedures // Physica Status Solidi. – 1984. – V. 81 (a). – № 1. – P. 343–351.
11. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. – М.: Недра, 1965. – 109 с.
12. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1967. – 685 с.
13. Кучис Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 621 с.
15. Гурьев В.А., Могилатов В.С., Потапов В.В. Участие в полевых экспериментах по выявлению эффекта Холла в геологической среде // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле. Материалы конференции. – Новосибирск, 19–23 ноября 2018. – С. 162–164.
16. Могилатов В.С., Потапов В.В., Горевячева А.А. Анализ и экспериментальное обнаружение гальваномагнитных явлений при зондированиях становлением // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Международная научная конференция. Сборник материалов в 6 т. – Новосибирск, 23–27 апреля 2018. – Т. 3. – С. 234–240.
17. Могилатов В.С., Плоткин В.В. Учет холловской проводимости в электромагнитных зондированиях Земли // Геомодель 2017: 19-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. Тезисы докладов. – Геленджик, 11–14 сентября 2017. – С. 43765 (6 с.)
18. Плоткин В.В., Могилатов В.С., Потапов В.В. Модификации метода Треффца для оценки вклада эффекта Холла при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 3. – С. 420–432.
19. Плоткин В.В. Проявления эффекта Холла по результатам поляризационного анализа магнитотеллурического поля // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Междунар. науч. конф. Сборник материалов в 6 т. – Новосибирск, 23–27 апреля 2018. – Т. 4. – С. 61–67.
20. Захаркин А.К. Разработка аппаратно-методического обеспечения импульсной индуктивной электроразведки для нефтепоисковых работ в условиях Сибирской платформы: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Новосибирск, 2000. – 26 с.
21. НПК «СибГеоСистемы». Станция электроразведочная FastSnap. Руководство по эксплуатации. – Новосибирск; Иркутск, 2007. – 12 с.
22. Phoenix Geophysics Ltd. V5 System 2000 MTU/MTU-A User Guide. – Toronto, 2010. – 193 p.

Поступила 31.05.2019 г.

## Информация об авторах

**Могилатов В.С.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Потапов В.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Захаркин А.К.**, кандидат технических наук, главный геофизик ООО «Цикл Гео».

**Гурьев В.А.**, лаборант лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Шеин А.Н.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 550.837

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE HALL EFFECT IN THE EARTH AT THE CONTROLLED SOURCE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD

**Vladimir S. Mogilatov**<sup>1</sup>,  
mvecs@ya.ru

**Vladimir V. Potapov**<sup>1</sup>,  
potapovvv@ipgg.sbras.ru

**Aleksandr K. Zaharkin**<sup>2</sup>,  
zaharkin@ngs.ru

**Vladimir A. Gurev**<sup>1</sup>,  
gurevva@ya.ru

**Aleksandr N. Shein**<sup>1</sup>,  
sheinan@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> OJSC «Tsikl Geo», 24/1, of. 78, Nizhegorodskaya street, Novosibirsk, 630102, Russia.

*In the period from 8 to 15 July 2018, the employees of the Laboratory of Geoelectricity of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS conducted field studies under the RFBR grant no. 17-05-00083 A. This effect should be very weak in all signals of controlled source transient electromagnetic method. The studies were carried out by the following electric prospecting methods: complex of electrical prospecting methods was chosen due to the methodical efficiency and relative simplicity of the work. Research problems: work area selection; measurement of transient electromagnetic signals by four radial MN lines for registration of  $E_R$  components, caused by the Hall effect; measurement of  $E_\varphi$  components for measurements control.*

**The relevance** of the research is primarily caused by the fact that the galvanomagnetic effects (including the Hall effect), arising in crossed electric and magnetic fields, are well known in physics, but have not been studied in relation to the geological environment – this means that these effects are not yet accounted for affect the signals of geoelectromagnetic soundings.

**The main aim** of the research is to discover the Hall effect in the geological media.

**Object:** the Hall effect in the geological media.

**Methods:** controlled source transient electromagnetic method, magnetotelluric sounding method.

**Results.** The field studies in 2018 are the first purposeful field studies to detect the Hall effect in the geological environment by electromagnetic sensing methods. In researchers opinion, the goal of research, according to preliminary data, was achieved. The Hall conductivity was estimated at  $\sim 1\text{--}2 \cdot 10^{-3}$  S/m.

### Key words:

Electrical exploration, controlled source transient electromagnetic (TEM) method, geomagnetic field, Hall effect, Lorentz effect.

*The study was performed with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project no. 17-05-00083 A.*

### REFERENCES

- Hall E.H. On a new action of the magnet on electric currents. *American Journal of Mathematics*, 1879, vol. 2, pp. 287–292.
- Beer A.C. Hall effect and the beauty and challenges of science. *The Hall Effect and its Applications*. New York, Plenum Press, 1980. pp. 299–338.
- Allgaier R.S. Some general input-output rules governing Hall coefficient behavior. *The Hall Effect and its Applications*. New York, Plenum Press, 1980. pp. 375–397.
- Herring C. Effect of random inhomogeneities on electrical and galvanomagnetic measurements. *Journal of Applied Physics*, 1960, vol. 31, no. 11, pp. 1939–1953.
- Juretschke H.J., Landauer R., Swanson J.A. Hall effect and conductivity in porous media. *Journal of Applied Physics*, 1956, vol. 27, no. 7, pp. 838–839.
- Cohen M.H., Jortner J. Effective medium theory for the Hall effect in disordered materials. *Physical Review Letters*, 1973, vol. 30, no. 15, pp. 696–698.
- Lei Tan Fu, Leu Len-Yi, Lee Chung Len. Specific contact resistivity measurement by a vertical Kelvin test structure. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions*, 1987, vol. ED-34, no. 6, pp. 1390–1395.
- De Mey G. Hall effect in a non-homogeneous magnetic field. *Solid State Electron*, 1977, vol. 20, no. 2, pp. 139–142.
- Komiyama S. A capacitive method for Hall effect measurement. *Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 25, no. 3, pp. 303–305.
- Oswald J., Feichtinger H., Czaputa R. A useful method to improve convergence in least-squares fitting procedures. *Physica Status Solidi*, 1984, vol. 81 (a), no. 1, pp. 343–351.
- Vanyan L.L. *Osnovy elektromagnitnykh zondirovaniy* [Electromagnetic sensing fundamentals]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 109 p.
- Ginzburg V.L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme* [Electromagnetic waves propagation in plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 685 p.
- Kuchis E.V. *Galvanomagnitnye efekty i metody ikh issledovaniya* [Galvanomagnetic effects and their investigation methods]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990. 264 p.
- Landau L.D., Lifshic E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Continuous media electrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 621 p.

15. Gurev V.A., Mogilatov V.S., Potapov V.V. Uchastie v polevykh eksperimentakh po vyyavleniyu effekta Kholla v geologicheskoy srede [Participation in field experiments to identify the Hall effect in the geological environment]. *IX Sibirskaya konferentsiya molodykh uchenykh po naukam o Zemle* [IX Siberian conference of young scientists in earth sciences]. Novosibirsk, November 19–23, 2018. pp. 162–164.
16. Mogilatov V.S., Potapov V.V., Goryavcheva A.A. Analiz i eksperimentalnoe obnaruzhenie galvanomagnitnykh yavleniy pri zondirovaniyakh stanovleniem [Analysis and experimental detection of galvanomagnetic phenomena in TEM]. *Interexpo GEO-Sibir. XIV Mezhdunarodny nauchny congress. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Ekonomika. Geoekologiya. Sbornik materialov* [Interexpo GEO-Siberia. XIV International scientific congress. International scientific conference. Subsoil use. Mining. Directions and technologies of search, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geoecology. Conference materials]. Novosibirsk, April 23–27, 2018. Vol. 3, pp. 234–240.
17. Mogilatov V.S., Plotkin V.V. Uchet khollovskoy provodimosti v elektromagnitnykh zondirovaniyakh Zemli [Accounting for the Hall conductivity in the electromagnetic sounding of the Earth]. *Geomodel 2017: 19 konferentsiya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdeniy nefiti i gaza. Tezisy dokladov* [Geomodel 2017: 19<sup>th</sup> Conference on exploration and development of oil and gas deposits. Abstracts]. Gelendzhik, September 11–14, 2017. p. 43765 (6 p.).
18. Plotkin V.V., Mogilatov V.S., Potapov V.V. Modifications of the Trefftz Method for Estimating the Contribution of the Hall Effect on Magnetotelluric Sounding. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 3, pp. 357–367.
19. Plotkin V.V. Proyavleniya effekta Kholla po rezultatam polyarizatsionnogo analiza magnitotelluricheskogo polya [Hall effect manifestations based on the results of polarization analysis of the magnetotelluric field]. *Interexpo GEO-Sibir. XIV Mezhdunarodny nauchny congress. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Ekonomika. Geoekologiya. Sbornik materialov* [Interexpo GEO-Siberia. XIV International scientific congress. International scientific conference. Subsoil use. Mining. Directions and technologies of search, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geoecology. Conference materials]. Novosibirsk, April 23–27, 2018. Vol. 4, pp. 61–67.
20. Zakharkin A.K. *Razrabotka apparaturno-metodicheskogo obespecheniya impulsnoy induktivnoy elektrorazvedki dlya neftepoiskovykh rabot v usloviyakh Sibirskoy platformy*. Avtoreferat Dis. kand. nauk [Development of hardware and methodological support of pulse inductive electric prospecting for oil prospecting works in the conditions of the Siberian platform. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2000. 26 p.
21. *NPK «SibGeoSistemy». Stantsiya elektrorazvedchnaya FastSnap. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [RPC «SibGeoSystems». FastSnap electric exploration station. User manual]. Novosibirsk, Irkutsk, 2007. 12 p.
22. *Phoenix Geophysics Ltd. V5 System 2000 MTU/MTU-A User Guide*. Toronto, 2010. 193 p.

Received: 31 May 2019.

#### Information about the authors

**Vladimir S. Mogilatov**, Dr. Sc., chief researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Vladimir V. Potapov**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Aleksandr K. Zaharkin**, Cand. Sc., chief geophysicist, OJSC «Tsikl Geo».

**Vladimir A. Gurev**, laboratorian, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Aleksandr N. Shein**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 622.276

## ОЦЕНКА ОХВАТА ПЛАСТА СИСТЕМОЙ РАЗРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ РАДИУСА ДРЕНИРОВАНИЯ СКВАЖИН

Поплыгин Владимир Валерьевич<sup>1</sup>,  
poplygin@bk.ru

Соколов Александр Владимирович<sup>1</sup>,  
sokolovalexandr.vladimirovich@gmail.com

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 616990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность исследования.** В гидродинамических симуляторах фильтрация флюидов описывается с помощью законов сохранения массы, в результате чего может оказаться, что значительная часть объекта разработки вовлечена в процесс дренирования. Данный подход может не вполне корректно оценить область притока жидкости к добывающей скважине. Зоны притока жидкости к скважине (зоны дренирования) часто схематизируют в виде концентричной к скважине окружности с радиусом, равным половине расстояния между забоями скважин. Данный подход не учитывает различие линий тока, границы пласта, его неоднородность и другие факторы. Значение радиуса дренирования особенно изменчиво в карбонатных коллекторах при изменении пластового давления. Достоверная оценка размера зоны дренирования скважин позволит более точно оценить степень охвата залежи разработкой, особенно в карбонатном коллекторе.

**Цель:** исследовать возможность охвата залежи нефти системой разработки с помощью оценки фактических радиусов дренирования скважин; определить наиболее эффективные технологии увеличения радиуса дренирования скважин.

**Объект:** Башкирская залежь на месторождении нефти в Соликамской депрессии. Средняя обводненность продукции скважин на залежи составляет 39,2 %. На залежи отмечается существенная зависимость фильтрационных параметров горных пород от пластовых и забойных давлений.

**Методы:** определение значений коэффициентов проницаемости и пьезопроводности на основе обработки результатов гидродинамических исследований.

**Результаты.** На текущий момент времени залежь нефти охвачена разработкой по площади на 40 %. На радиус дренирования скважин существенное влияние оказывает коэффициент проницаемости. На рассматриваемом объекте отмечена сильная взаимосвязь между коэффициентом проницаемости и энергетическим состоянием залежи. Понижение значения радиусов дренирования скважин может существенно уменьшить охват залежи системой разработки и увеличить сроки выработки извлекаемых запасов нефти. На рассматриваемом объекте разработки наиболее эффективные методы увеличения радиусов дренирования скважин – кислотные гидроразрывы и комбинированные с другими технологиями кислотные обработки.

### Ключевые слова:

Залежь нефти, радиус дренирования, проницаемость, забойное давление, нефтеотдача.

### Введение

В настоящее время плотность запасов нефти на залежи определяется с помощью гидродинамических симуляторов. Наиболее распространены модели black oil, в которых численно решаются системы уравнений, описывающих трехфазное движение флюидов в пористой среде. Фильтрация флюидов описывается с помощью законов сохранения массы, в результате чего может оказаться, что значительная часть объекта разработки вовлечена в процесс дренирования. Однако данный подход может не вполне корректно оценить область притока жидкости к добывающей скважине. Зоны притока жидкости к скважине (зоны дренирования) часто схематизируют в виде концентричной к скважине окружности с радиусом, равным половине расстояния между забоями скважин. Данный подход не всегда является достоверным, поскольку не учитывает различие линий тока, границы пласта, его неоднородность и другие факторы. Значение радиуса дренирования особенно изменчиво в карбонатных коллекторах при изменении пластового давления. На сегодняшний день доля разрабатываемых объектов, приуроченная к карбонатным сложнопостроенным залежам в Пермском крае, составляет более 50 %. Разработка таких

залежей осложнена отложениями асфальтенов, смол и парафинов, деформациями, выделением в свободную фазу растворенного в нефти газа и др., что в конечном итоге может сказаться на уровнях добычи нефти [1–9].

Достоверная оценка размера зоны дренирования скважин позволит более точно определить степень охвата залежи разработкой, особенно в карбонатном коллекторе.

### Объект исследования

В Пермском крае значительная часть продуктивных карбонатных коллекторов приурочена к Соликамской депрессии [10]. Рассмотрим башкирский объект разработки одного из типичных месторождений указанной тектонической структуры. Промышленная разработка залежи началась в 1998 г. Основные геолого-физические параметры и показатели разработки залежи приведены в таблице.

Из таблицы следует, что залежь содержит легкую газонасыщенную нефть. Горные породы характеризуются высокой проницаемостью и расчлененностью. Из-за позднего ввода системы поддержания пластового давления текущее давление в пласте существенно ниже начальной величины. В специальной литературе отмечена существенная зависимость фильтрационно-емкостных

параметров месторождений от энергетического состояния залежей [11–14]. Согласно [15], текущие фильтрационные параметры рассматриваемой залежи понижены относительно начальных величин в среднем на 20 %. Так как забойные давления ( $P_{зоб}$ ) на добывающих скважинах изменяются в пределах 2,1...10,7 МПа и существенно ниже давления насыщения ( $P_{нас}$ ), фильтрация дополнительно осложнена выделяющимся из нефти в свободную фазу газом, а коэффициенты проницаемости и пьезопроводности существенно снижены (рис. 1).

**Таблица.** Основные геолого-физические параметры и показатели разработки залежи

**Table.** Main geological and physical parameters and indicators of deposit development

Параметр Parameter	Ед. измер. Units	Значение Value
Проницаемость по керну Core permeability	мкм <sup>2</sup> micron <sup>2</sup>	0,134
Коэффициент песчаности Sandiness coefficient	доли ед. unit fraction	0,35
Коэффициент расчлененности Number of permeable intervals		6,1
Вязкость нефти в пластовых условиях Reservoir oil viscosity	мПа*с mPa*s	2,41
Начальное пластовое давление Initial reservoir pressure	МПа MPa	15,1
Газонасыщенность пластовой нефти Gas saturation	м <sup>3</sup> /т m <sup>3</sup> /t	53,8
Давление насыщения/Saturation pressure	Мпа/МПа	13,58
Отбор от НИЗ/Oil recovery	%	51,3
Обводненность/Water cut		39,2

### Оценка радиусов дренирования скважин

В специальной литературе приведена формула для оценки радиусов дренирования скважин [16]:

$$R_k = \sqrt{\pi k t}, \quad (1)$$

где  $k$  – пьезопроводность м<sup>2</sup>/с;  $t$  – время полного восстановления давления в скважине, с.

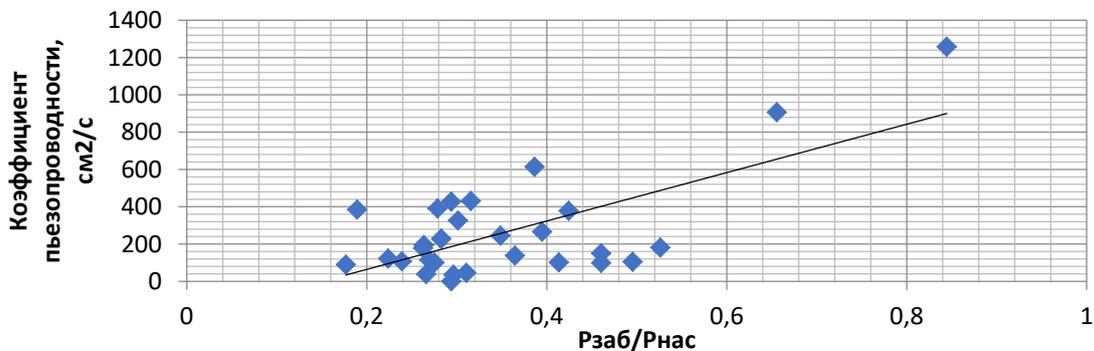
Для скважин рассматриваемой залежи на основании результатов гидродинамических исследований выполнено определение параметров для вычисления пьезопроводности, а также с помощью метода произведения – время полного восстановления давления в скважине. Далее по формуле (1) определены радиусы дренирования скважин

Выполнена оценка влияния на значение радиусов дренирования скважин основных геолого-технических параметров. Для башкирской залежи Озерного месторождения отмечено, что наибольшее влияние на радиус дренирования скважин оказывают значения коэффициентов пьезопроводности, проницаемости и энергетического состояния (рис. 2, 3).

Снижение радиуса дренирования при уменьшении пластовых и забойных давлений можно объяснить деформациями коллектора и снижением фазовой проницаемости по жидкости.

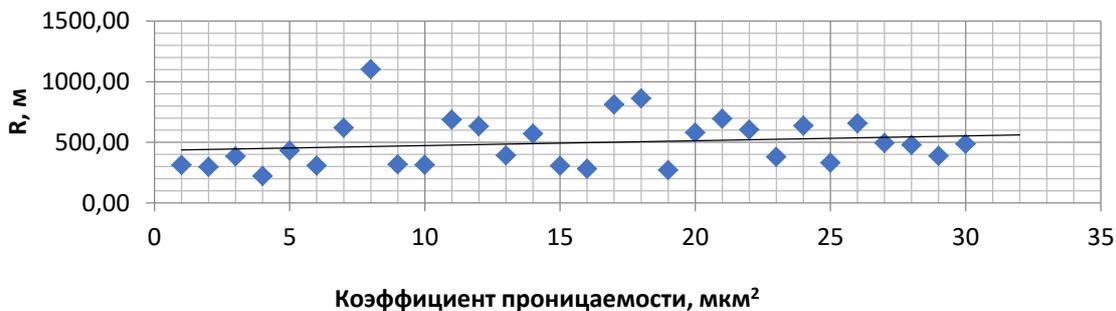
### Оценка охвата пласта системой разработки

На карту плотности запасов нанесены значения радиусов дренирования скважин (рис. 4).



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента пьезопроводности от относительного забойного давления

**Fig. 1.** Dependence of the piezoconductivity coefficient on the relative bottomhole pressure



**Рис. 2.** Зависимость R от коэффициента проницаемости призабойной зоны

**Fig. 2.** R dependence on the permeability coefficient of the bottomhole zone

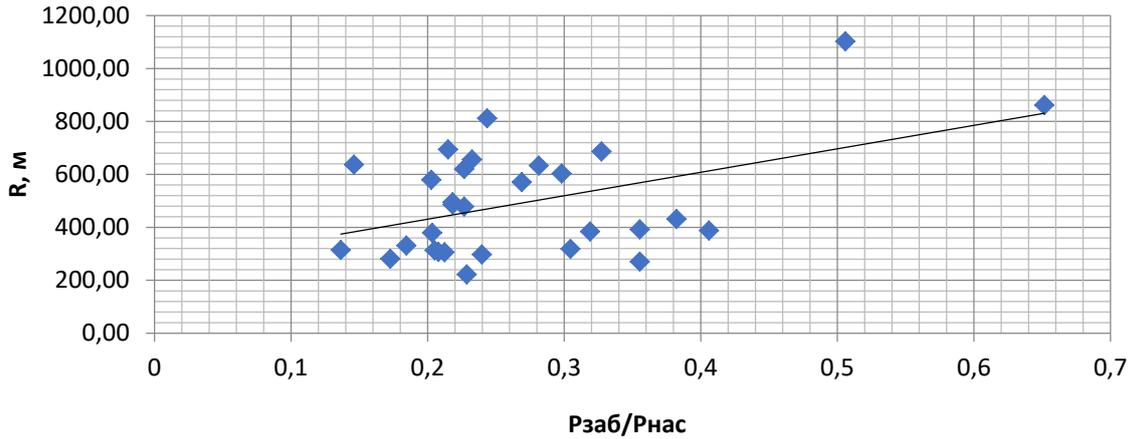


Рис. 3. Зависимость  $R$  от относительного забойного давления  
 Fig. 3.  $R$  dependence on the relative bottomhole pressure

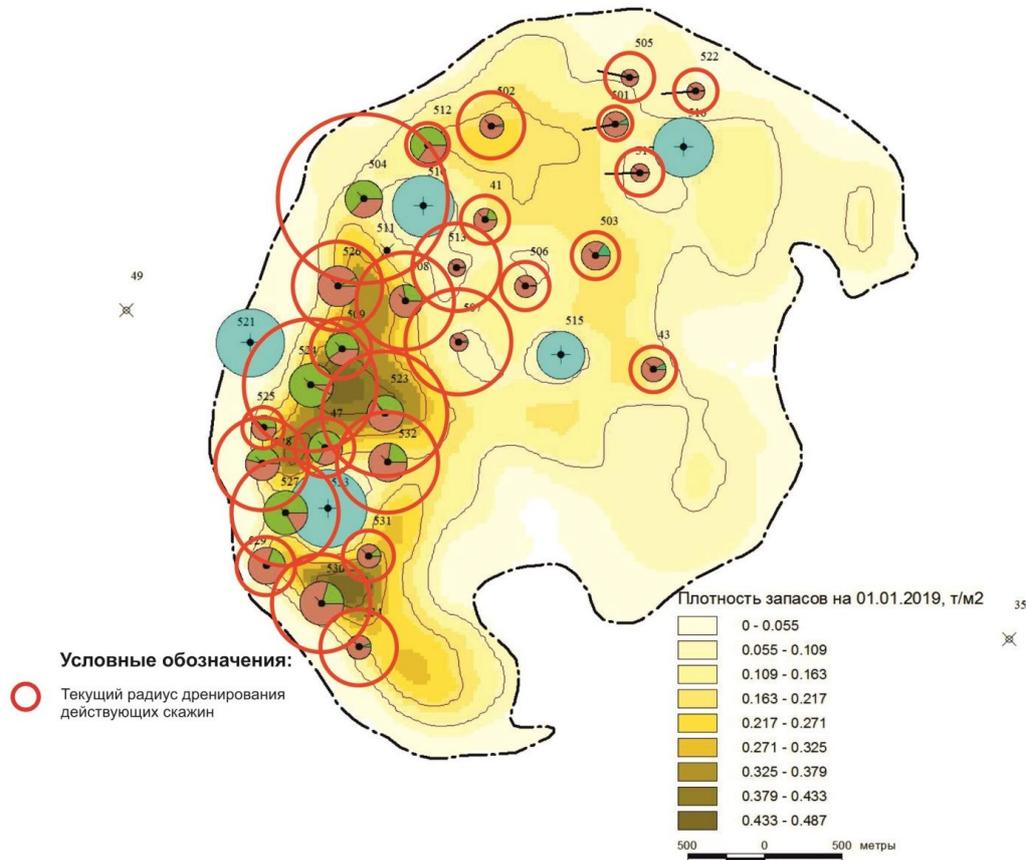


Рис. 4. Карта плотности запасов с радиусами дренирования скважин  
 Fig. 4. Map of stock density with well drainage radii

На объекте имеются участки, не вовлеченные в разработку. Скважины восточной части залежи характеризуются малыми значениями радиуса дренирования, что связано с худшими значениями фильтрационных параметров по сравнению с западной частью залежи. Участок в северной части залежи между скважинами №№ 502, 41, 501, 503, 517 не охвачен дренированием. Также не охвачен разработкой участок между скважинами №№ 503, 43, однако пласт БшЗ на данном участке насыщен водой и возможно

обводнение скважины, то же можно сказать о участке к юго-востоку от скважин №№ 531, 530, 524, участок характеризуется хорошими запасами, но пласт БшЗ на данном участке насыщен водой. Участок к востоку от скважины № 503 и южнее скважины № 516 на 500–700 м не вовлечён в разработку и обладает невысокой плотностью запасов.

Общий охват залежи системой добывающих скважин на текущую дату составляет около 40 % от площади всей залежи внутри водонефтяного контакта.

### Влияние на радиус дренирования геолого-технических мероприятий

Для определения влияния геолого-технических мероприятий (ГТМ) на  $R$  рассмотрена история проведения ГТМ на залежи и определены  $R$  до и после мероприятий. Среднее увеличение  $R$  по каждому виду ГТМ представлено на рис. 5.

Наибольшая эффективность работ получена после кислотного гидроразрыва пласта [17]. Результативность комбинированной кислотной обработки, проведенной совместно с другим мероприятием, выше, чем

у простой кислотной обработки (1,7 и 1,59 соответственно). Для кислотных обработок без дополнительных мероприятий была сравнена эффективность составов Флаксокор-210 и ДН-9010, составы использовались 8 и 5 раз соответственно. Эффективность состава Флаксокор-210 оказалась выше, среднее увеличение радиуса дренирования равно 1,69, а для состава ДН-9010 среднее увеличение равно 1,41. В целом мероприятия с кислотным воздействием являются наиболее эффективными для карбонатных коллекторов [18–20].

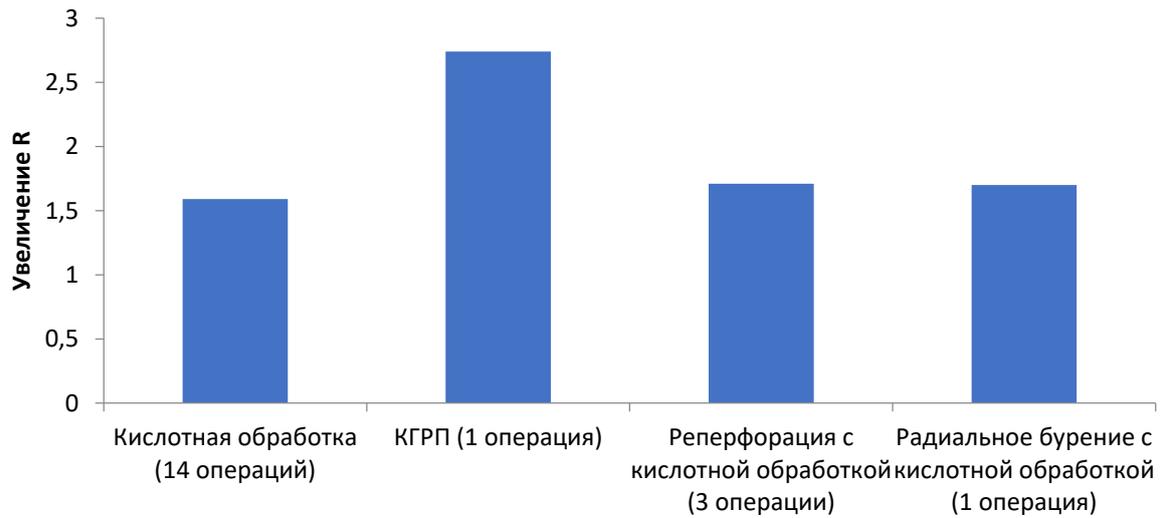


Рис. 5. Среднее увеличение радиуса дренирования после ГТМ

Fig. 5. Average increase in drainage radius after geological and technical measures

### Выводы

1. Определение радиуса дренирования для добывающих скважин позволяет оценить охват системой разработки залежи нефти. На текущий момент времени залежь нефти охвачена разработкой по площади на 40 %.
2. На радиус дренирования скважин существенное влияние оказывает коэффициент проницаемости. На рассматриваемом объекте отмечена сильная взаимосвязь между коэффициентом проницаемости и энергетическим состоянием залежи. При снижении забойных давлений происходит уменьшение коэффициента проницаемости из-за деформаций коллектора и выделения в свободную

3. На рассматриваемом объекте разработки наиболее эффективными методами увеличения радиусов дренирования скважин являются кислотные гидроразрывы и комбинированные с другими технологиями кислотные обработки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10034).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun H., Vega S., Tao G. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 419–429.
2. Hosseini E. Experimental investigation of effect of asphaltene deposition on oil relative permeability, rock wettability alteration, and recovery in WAG process // Petroleum Science and Technology. – 2019. – V. 37. – Iss. 20. – P. 2150–2159.
3. Moradi M., Shamloo A., Dezfuli A.D. A sequential implicit discrete fracture model for three-dimensional coupled flow-geomechanics problems in naturally fractured porous media //

- Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 150. – P. 312–322.
4. Coupled geomechanics and pore confinement effects for modeling unconventional shale reservoirs / Y. Xiong, P.H. Winterfeld, Y.-S. Wu, Z. Huang // Unconventional Resources Technology Conference. – Denver, United States, 2014. DOI: 10.15530/urtec-2014-1923960.
5. Fluid flow numerical experiments of faulted porous carbonates, Northwest Sicily (Italy) / M. Antonellini, A. Cilona, E. Tondi, M. Zambrano, F. Agosta // Marine and Petroleum Geology. – 2014. – V. 55. – P. 186–201.
6. Wilson T.H., Smith V., Brown A. Developing a model discrete fracture network, drilling, and enhanced oil recovery strategy in an

- unconventional naturally fractured reservoir using integrated field, image log, and three-dimensional seismic data // AAPG Bulletin. – 2015. – V. 99. – Iss. 4. – P. 735–762.
7. Feng Z., Shuhong W. Fully coupled hydromechanical flow simulation of water-induced dynamic fractures in low-permeability reservoirs // International Field Exploration and Development Conference, IFEDC 2016. – Beijing, China, 2016. – Iss. CP706.
  8. Повышение эффективности разработки месторождений углеводородов на основе комплексных геомеханических исследований / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, Д.В. Шустов, С.Ю. Якимов, А.Э. Кухтинский // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 3. – С. 66–69.
  9. Лебединец Н.П. О деформационных изменениях проницаемости трещиноватых коллекторов (в порядке обсуждения) // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 99–101.
  10. Гладких Е.А., Хижняк Г.П., Галкин В.И. Влияние фильтрационно-емкостных свойств объектов разработки на величину коэффициента вытеснения нефти в различных геолого-физических условиях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 77–85.
  11. Mahzari P., Jones A.P., Oelkers E.H. An integrated evaluation of enhanced oil recovery and geochemical processes for carbonated water injection in carbonate rocks // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 181. – Iss. № 106188.
  12. Parameters affecting load recovery and oil breakthrough time after hydraulic fracturing in tight oil wells / B. Zanganeh, M. Soroush, J.D. Williams-Kovacs, C.R. Clarkson // Unconventional Resources Conference. – Calgary, Canada, 2015. – № SPE-175941-MS.
  13. Experimental and analytical core and geomechanical data analysis of a tight oil carbonate formation / A. Islam, A.S. Ziarani, A. Cui, S. Ehlers, B. Schneider // Proceedings. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Amsterdam, Netherlands, 27–29 October 2014. – V. 6. – P. 4772–4792.
  14. Щербаков А.А., Хижняк Г.П., Галкин В.И. Прогнозирование коэффициента продуктивности скважин с боковым стволом (на примере Уньвинского месторождения) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 93–99.
  15. Поплыгин В.В., Уирсигроч М., Павловская Е.Е. Прогнозирование изменения коэффициентов продуктивности скважин в башкирско-серпуховских отложениях месторождений севера Пермского края // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 78–81.
  16. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. – М.: Изд-во «Недра», 1973. – 248 с.
  17. Продуктивность скважин после кислотных гидроразрывов пласта на Гагаринском и Озерном месторождениях / В.А. Мордвинов, В.В. Поплыгин, Д.Д. Сидоренко, А.Р. Шаймарданов // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 44–45.
  18. Jahani N., Haugen B., Berge G. Coupled fluid flow and elastoplastic damage analysis for fractured porous chalk with induced wormhole // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – V. 80. – P. 129–136.
  19. Эффективность кислотных обработок скважин, эксплуатирующих башкирские отложения на месторождениях Пермского края / Е. Павловская, В.В. Поплыгин, Д.Ю. Иванов, И.Ю. Елисеев // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 28–30.
  20. Мартюшев Д.А. Лабораторные исследования кислотных составов для обработки коллекторов, характеризующихся различной карбонатностью и структурой пустотного пространства горных пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 6–12.

Поступила 12.03.2020 г.

#### Информация об авторах

**Поплыгин В.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Соколов А.В.**, инженер ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 622.276

## ESTIMATION OF A RESERVOIR COVERAGE BY THE DEVELOPMENT SYSTEM USING THE DRAINING WELL RADIUS

Vladimir V. Poplygin<sup>1</sup>,  
poplygin@bk.ru

Aleksandr V. Sokolov<sup>1</sup>,  
sokolovalexandr.vladimirovich@gmail.com

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

**Relevance of the research.** In hydrodynamic simulators, fluid filtration is described using the laws of mass conservation, as a result of which it may turn out that a significant part of the development object is involved in the drainage process. This approach may not quite correctly assess the region of fluid inflow to the producing well. The zones of fluid flow to the well (drainage zones) are often schematized as a circle concentric to the well with a radius equal to half the distance between the bottom of the wells. This approach does not take into account the difference in streamlines, reservoir boundaries, its heterogeneity and other factors. The value of the drainage radius is especially variable in carbonate reservoirs with changes in reservoir pressure. A reliable estimate of the size of the well drainage zone will make it possible to more accurately assess the extent of reservoir development, especially in the carbonate reservoir.

**The aim** of the research is to investigate the possibility of oil field coverage by the development system by assessing the actual radius of well drainage; to determine the most effective technologies for increasing the radius of well drainage.

**Object:** Bashkir deposit at the oil field in the Solikamsk depression. The average water cut of well production in the reservoir is 39,2 %. There is a significant dependence of rock filtration parameters on reservoir and bottomhole pressures.

**Methods:** determination of the values of the permeability coefficients and piezococonductivity based on processing the results of hydrodynamic studies.

**Results.** At the current time, the oil reservoir is for 40 % covered by development. The radius of drainage of wells is significantly affected by the permeability coefficient. At the object under consideration, a strong relationship between the permeability coefficient and the energy state of the reservoir was noted. Reducing the values of well drainage radii can significantly decrease the reservoir coverage by the development system and increase the terms of development of recoverable oil reserves. At the considered development object, the most effective methods for increasing well drainage radii are acid fractures and acid treatments combined with other technologies.

### Key words:

Oil layer, drainage radius, permeability, bottom hole pressure, oil recovery.

The research was financed through the grant of the Russian Science Foundation (project no. 19-79-10034).

### REFERENCES

- Sun H., Vega S., Tao G. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 419–429.
- Hosseini E. Experimental investigation of effect of asphaltene deposition on oil relative permeability, rock wettability alteration, and recovery in WAG process. *Petroleum Science and Technology*, 2019, vol. 37, Iss. 20, pp. 2150–2159.
- Moradi M., Shamloo A., Dezfuli A.D. A sequential implicit discrete fracture model for three-dimensional coupled flow-geomechanics problems in naturally fractured porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 150, pp. 312–322.
- Xiong Y., Winterfeld P.H., Wu Y.-S., Huang Z. Coupled geomechanics and pore confinement effects for modeling unconventional shale reservoirs. *Unconventional Resources Technology Conference*. Denver, United States, 2014. DOI: 10.15530/urtec-2014-1923960.
- Antonellini M., Cilona A., Tondi E., Zambrano M., Agosta F. Fluid flow numerical experiments of faulted porous carbonates, Northwest Sicily (Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 2014, vol. 55, pp. 186–201.
- Wilson T.H., Smith V., Brown A. Developing a model discrete fracture network, drilling, and enhanced oil recovery strategy in an unconventional naturally fractured reservoir using integrated field, image log, and three-dimensional seismic data. *AAPG Bulletin*, 2015, vol. 99, Iss. 4, pp. 735–762.
- Feng Z., Shuhong W. Fully coupled hydromechanical flow simulation of water -induced dynamic fractures in low-permeability reservoirs. *International Field Exploration and Development Conference, IFEDC 2016*. Beijing, China, 2016. Iss. CP706.
- Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Shustov D.V., Yakimov S.Yu., Kukhtinskii A.E. Increasing efficiency of hydrocarbon fields development based on complex geomechanical research. *Oil Industry*, 2019, no. 3, pp. 66–69. In Rus.
- Lebedynets N.P. About deformation changes of fractured reservoirs permeability. *Oil Industry*, 2014, no. 6, pp. 99–101. In Rus.
- Gladkikh E.A., Khizhnyak G.P., Galkin V.I. Influence of filtration-capacitive properties of development objects on the value of oil displacement efficiency in various geological and physical conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 77–85. In Rus.
- Mahzari P., Jones A.P., Oelkers E.H. An integrated evaluation of enhanced oil recovery and geochemical processes for carbonated water injection in carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 181, Iss. no. 106188.
- Zanganeh B., Soroush M., Williams-Kovacs J.D., Clarkson C.R. Parameters affecting load recovery and oil breakthrough time after hydraulic fracturing in tight oil wells. *Unconventional Resources Conference*. Calgary, Canada, 2015. No. SPE-175941-MS.
- Islam A., Ziarani A.S., Cui A., Ehlers S., Schneider B. Experimental and analytical core and geomechanical data analysis of a tight oil carbonate formation. *Proceedings. SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Amsterdam, Netherlands, 27–29 October 2014. Vol. 6, pp. 4772–4792.
- Shcherbakov A.A., Khizhnyak G.P., Galkin V.I. Prediction of sidetrack wells productivity index (on example of the Unvinskoe field). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 93–99. In Rus.

15. Poplygin V.V., Wiercigroch M., Pavlovskaja E.E. Forecasting changes of the wells productive coefficients for the Bashkirian-Serpukhovian deposits in the north of the Perm region. *Oil Industry*, 2016, no. 10, pp. 78–81. In Rus.
16. Buzinov S.N., Umrikhin I.D. *Gidrodinamicheskie metody issledovaniya skvazhin i plastov* [Hydrodynamic methods for the study of wells and reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 248 p.
17. Mordvinov V.A., Poplygin V.V., Sidorenko D.D., Shaymardanov A.R. Wells productivity after acid fracturing in the Gagarinskoye and Ozernoye oilfields. *Oil Industry*, 2013, no. 4, pp. 44–45. In Rus.
18. Jahani N., Haugen B., Berge G. Coupled fluid flow and elastoplastic damage analysis for fractured porous chalk with induced wormhole. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, vol. 80, pp. 129–136.
19. Pavlovskaja E., Poplygin V.V., Ivanov D.Yu., Eliseyev I.Yu. Effectiveness of acidizing in Bashkir deposits of Perm Region. *Oil Industry*, 2015, no. 3, pp. 28–30. In Rus.
20. Martyushev D.A. Laboratory studies of acid compositions for treating reservoir, characterized by various carbonate content and void structure of rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 6–12. In Rus.

Received: 12 March 2020.

#### Information about the authors

**Vladimir V. Poplygin**, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Aleksandr V. Sokolov**, engineer, LUKOIL-Engineering LLC-PermNIPIneft.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 29.04.2020. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,82. Уч.-изд. л. 23,35.  
Заказ 66-20. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ