

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 330, № 2, 2019

# 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)  
Зиятдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)  
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)  
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)  
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)  
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)  
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)  
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)  
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)  
Кирынова 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, 2019

## 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 330, № 2, 2019

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

**AIMS AND SCOPE**

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

The journal was founded in 1903.

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

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;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and questions Geoecology;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

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 2 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

- Математическое моделирование совместной конверсии угля и шлама сточных вод в обращенном слоевом газогенераторе**  
Донской И.Г. **7**
- Оценка плотности частиц твердой фазы пульпы с использованием измерительных каналов на базе гамма-излучения и волн Лэмба**  
Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В., Грищенко С.Н., Бровко Д.В., Паранюк Д.И., Сердюк А.Ю. **19**
- Экспериментальная оценка степени очистки изотопов самария от щелочных и щелочноземельных элементов при осаждении гидроокисей многовалентных металлов**  
Сальменбаев С.Е., Макарычев С.В., Степанова А.А., Нургайсинова Н.К. **34**
- Изотопный состав атмосферных осадков в предгорьях Алтая: данные наблюдений и интерполяции**  
Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина Н.Ю., Папина Т.С. **44**
- Ветроэнергетические ресурсы центральных районов Республики Алтай**  
Севастьянов В.В., Сапьян Е.С. **55**
- Вариативный учет ценообразующих факторов при кадастровой оценке земель (на примере города Санкт-Петербург)**  
Лепихина О.Ю., Правдина Е.А. **65**
- Обоснование технологии интенсификации добычи газа из продуктивных пластов с различными типами коллекторов в условиях месторождений морского шельфа**  
Смурьгин В.И., Рабаев Р.У., Блинов С.А., Бакишев Т.Б., Султанов Ш.Х. **75**
- Минерально-геохимическая зональность золотоносных кор выветривания Томь-Яйского междуречья**  
Янченко О.М., Ворошилов В.Г., Тимкин Т.В., Зиаи М. **83**
- Взаимодействие монацита и бифторида аммония**  
Муслимова А.В., Буйновский А.С., Молоков П.Б., Софронов В.Л. **95**
- Совместное каталитическое сжигание сажи и водорода в кипящем слое**  
Языков Н.А., Симонов А.Д. **108**
- Особенности использования геотермальной энергии с применением теплонасосных установок в условиях низких температур воздуха**  
Максимов В.И., Салум А. **115**
- Современное состояние вольфрамовой промышленности России**  
Хатков В.Ю., Боярко Г.Ю. **124**
- Геология апт-альбских пород карбонатной платформы осадочной группы Коголло и последствия аноксидных океанических событий бассейна Маракайбо (северо-западная часть Южной Америки)**  
Аура Самид Гарсия Бальса **138**
- Минералогия и геохимия тонштейнов в углях Бейского месторождения Минусинского бассейна**  
Вергунев А.В., Арбузов С.И., Соболенко В.М. **155**
- Теоретическая модель накопления углеводородов в куполе с учётом гидратообразования, лимитирующегося теплообменом**  
Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. **167**
- Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского горно-обогатительного комбината в Якутии**  
Строкова Л.А., Дмитриева С.А., Осьмушкина Н.В., Осьмушкин А.В. **175**
- Mathematical modelling of coal and sewage sludge co-conversion using downdraft gasifier**  
Donskoy I.G. **7**
- Evaluation of particle density of pulp solid phase using gamma-ray and Lamb waves measuring channels**  
Morkun V.S., Morkun N.V., Tron V.V., Hryshchenko S.M., Brovko D.V., Paranyuk D.I., Serdyuk A.Yu. **19**
- Experimental evaluation of the degree of samarium isotopes purification from alkaline and alkaline-earth elements by precipitation of hydroxides of polyvalent metals**  
Salmenbaev S.E., Makarychev S.V., Stepanova A.A., Nurgaysinova N.K. **34**
- Isotopic composition of precipitation in Altai foothills: observation and interpolation data**  
Malygina N.S., Eirikh A.N., Kurepina N.Yu., Papina T.S. **44**
- Windpower resources of central regions of the Altai Republic**  
Sevastyanov V.V., Sapian E.S. **55**
- Variable accounting of pricing factors at land parcels cadastral valuation (on the example of Saint-Petersburg)**  
Lepikhina O.Yu., Pravdina E.A. **65**
- Justification of technology of stimulation of gas production from productive formations with various types of reservoirs in the conditions of the offshore fields**  
Smurygin V.I., Rabaev R.U., Blinov S.A., Bakishev T.B., Sultanov Sh.Kh. **75**
- Mineral-geochemical zonality of golden-bearing weathering crust of the Tom-Yaya interfluvium**  
Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Ziaii M. **83**
- Interaction of monazite and ammonium bifluoride**  
Muslimova A.V., Buinovskiy A.S., Molokov P.B., Sofronov V.L. **95**
- Catalytic co-combustion of soot and hydrogen in fluidized bed**  
Yazykov N.N., Simonov A.D. **108**
- Features of geothermal energy use with application of heat pump units under low air temperature conditions**  
Maksimov V.I., Salum A. **115**
- Current state of tungsten industry in Russia**  
Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu. **124**
- Geology of the Aptian-Albian Cogollo Group carbonate platform and implications with the Oceanic Anoxic Events, Maracaibo basin, northwestern South America**  
García A.S. **138**
- Mineralogy and geochemistry of tonsteins in the Beysk coal deposit of the Minusinsk coal basin**  
Vergunov A.V., Arbuzov S.I., Sobolenko V.M. **155**
- Theoretical model for hydrocarbon accumulation in a dome taking into account condensation, limited by heat transfer**  
Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. **167**
- Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia**  
Strokov L.A., Dmitrieva S.A., Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. **175**

- |  |   |
|--|---|
| <p><b>Применение методов компьютерного моделирования зон затопления при максимальных расчетных уровнях воды для решения проектных задач при рекультивации нарушенных земель, а также проектировании зданий и сооружений вблизи водных объектов</b><br/>             Романовский Р.В.</p> <p><b>Подход к автоматизированному формированию норм времени на техническое обслуживание средств КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи предприятий нефтегазовой отрасли</b><br/>             Савельев А.О., Комагоров В.П., Михалевич С.С.</p> <p><b>Элементный состав воды биологической как индикатор техногенеза</b><br/>             Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Корогод Н.П., Хвашевская А.А., Копылова Ю.Г., Мазурова И.С., Муканова Р.Ж., Туркбенов Т.К., Скрипник М.И., Беляновская А.И.</p> <p><b>Литологические особенности и органическое вещество осадочных отложений юго-восточной части моря Лаптевых (мыс Муостах)</b><br/>             Перевертайло Т.Г., Кажумуханова М.З., Недоливко Н.М., Гринько А.А., Шахова Н.Е., Дударев О.В., Гершелис Е.В., Мазуров А.К., Семилетов И.П.</p> | <p><b>186 Application of computer modeling methods of flood zones at maximum design water levels for solving project tasks in the disturbed lands recultivation and design of buildings and facilities near water bodies</b><br/>             Romanovskiy R.V.</p> <p><b>202 Approach to automated formation time norms for maintenance of control and testing instrumentation, APCS and communication equipment of oil and gas enterprises</b><br/>             Savelev A.O., Komagorov V.P., Mikhalevich S.S.</p> <p><b>214 Elemental composition of biological water as an indicator of technogenesis</b><br/>             Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Korogod N.P., Khvashchevskaya A.A., Kopylova Yu.G., Mazurova I.S., Mukanova R.Zh., Turkbenov T.K., Skripnik M.I., Belyanovskaya A.I.</p> <p><b>224 Lithological features and organic matter of sediments in the south-eastern Laptev sea (Muostakh cape)</b><br/>             Perevertaylo T.G., Kazhumukhanova M.Z., Nedolivko N.V., Grinko A.A., Shakhova N.E., Dudarev O.V., Gershelis E.V., Mazurov A.K., Semiletov I.P.</p> |
|--|---|

УДК 662.7

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЯ И ШЛАМА СТОЧНЫХ ВОД В ОБРАЩЕННОМ СЛОЕВОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

Донской Игорь Геннадьевич,  
donskoy.chem@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью утилизации бытовых и промышленных отходов. Утилизация горючих отходов, таких как шламы сточных вод, может быть совмещена с производством энергии для небольших потребителей. Одним из способов такой утилизации может стать газификация, позволяющая получить горючий газ, пригодный для получения тепловой и электрической энергии.

**Цель:** на основании результатов математического моделирования оценить эффективность совместной конверсии шлама с более качественным топливом (бурый уголь) при разных условиях проведения процесса (коэффициент избытка окислителя, состав топливной смеси, начальная влажность шлама сточных вод); оценить допустимую долю шлама в смеси с углем.

**Объект:** процесс обращенной слоевой газификации смесей бурого угля и шлама сточных вод.

**Метод:** математическое моделирование процесса слоевой термохимической конверсии твердых топлив с помощью разработанной ранее автором стационарной одномерной модели.

**Результаты.** Построены расчетные зависимости характеристик процесса газификации (химический КПД, состав и калорийность газа) от удельного расхода дутья, отношения уголь/шлам (0–100 %) и начальной влажности шлама (10–40 %). Определены максимальные значения доли шлама в смеси с углем при фиксированном на уровне 60–70 % химическом КПД и максимальные значения химического КПД при фиксированной на уровне 20–30 % доле шлама в смеси с углем (для того чтобы избежать спекания слоя). При влажности шлама 40 % его максимальная доля в смеси с углем может достигать 50 % (при исключении спекания). Влага, содержащаяся в шламе, испаряется и выступает в качестве дополнительного газифицирующего агента. При ограничении доли шлама в смеси с углем на уровне 20–30 % эффективность газификации падает незначительно по сравнению с углем без добавок шлама.

### Ключевые слова:

Газификация, уголь, шлам сточных вод, математическое моделирование, химический КПД.

### Введение

При очистке сточных вод основным отходом является шлам, представляющий собой обводненную смесь органических и неорганических веществ. По статистике, на каждого человека приходится порядка нескольких килограммов шлама в год [1], поэтому во многих странах его уничтожение становится важной задачей. Среди основных проблем переработки шлама выделяют: высокую влажность, нестабильность состава и особенности термического поведения (образование смол, спекание органической массы и золы).

Среди технологий переработки шлама основную долю занимает сжигание. Низкую теплотворную способность шлама обычно компенсируют за счет сжигания в смеси с качественными топливами, такими как углеводороды, биомасса и уголь [2]. Для предотвращения спекания при сжигании шлама часто используются вращающиеся печи, проталкивающие шнеки [3, 4], сжигание в кипящем слое [5]. В работе [6] предложен эффективный способ газификации шлама в воде при сверхкритических условиях (750 °C, 30 МПа). В данной работе рассматривается обращенный слоевой процесс газификации, который характеризуется пониженным загрязнением генераторного газа смолистыми продуктами за счет разложения в высокотемпературной окислительной зоне и фильтрации в восстановительной зоне.

Настоящая статья посвящена разработке математической модели газификации шлама в плотном

слое вместе с углем, а также использованию этой модели для поиска оптимальных условий проведения процесса.

### Газификация и совместная газификация шлама

Термогравиметрический анализ образцов шлама показывает наличие нескольких стадий разложения [7–9], которые обычно имеют более размытый характер по сравнению с другими топливами (такими как уголь и биомасса). В работе [10] был исследован сдвиг ТГ-кривых при изменении концентрации кислорода в дутье, что позволило уточнить численные значения кинетических коэффициентов для отдельных стадий. Совместная конверсия шлама с углем в условиях ТГА исследовалась в работе [11], где был сделан вывод об аддитивности выгорания компонентов смеси. Похожие результаты получены в работе [12]. В работе [13] были обнаружены небольшие отклонения от аддитивности. Эти данные, однако, получены для небольших скоростей нагрева, когда наложения стадий пиролиза и выгорания отдельных компонентов не происходит.

Эксперименты по выгоранию одиночных частиц гранулированного шлама проводились в работах [14, 15]. Авторы получили набор экспериментальных данных по кинетике выгорания для широкого диапазона условий, в том числе при совместном окислении с углем. Результаты исследований собраны в виде статистических моделей, которые позволяют прогнозировать отклик процесса в

пределах заданных значений размеров частиц, а также температуры и скорости воздушного дутья. В работе [16] проводились измерения в пылевоздушной струе, были исследованы особенности поведения отдельных частиц, такие как образование фронта горения летучих, образование разных типов конденсированных частиц (твердый остаток пиролиза, спекшаяся смола, частицы неорганических включений). Получены зависимости характеристик горения струи и отдельных частиц от размеров частиц, концентрации кислорода и условий топливподготовки.

Газификация гранулированного шлама с влажностью 12 % и зольностью 23 % в обращенном слоевом реакторе проводилась в работе [17]. Авторам удалось добиться стационарных режимов с температурой в ядре горения порядка 1000–1100 °С, однако содержание смол и пыли в сыром газе достигает 6–8 г/нм<sup>3</sup> – такой уровень загрязнения требует дополнительной очистки газа перед сжиганием.

Одностадийный процесс газификации шлама в реакторе кипящего слоя исследовался в работе [18]. Авторы предложили упрощенную кинетическую модель разложения шлама, которую применили для описания наблюдаемых эффектов. Для снижения выхода смолы используют материал слоя с каталитическими свойствами [19], дутье с повышенной концентрацией кислорода [20]. В работе [21] предложен способ газификации сухого (влажность 2–8 %) шлама в двухстадийном реакторе кипящего слоя. Образующиеся на первой стадии смолистые продукты сорбируются и разлагаются на второй стадии в слое активного компонента (активированный уголь, доломит), благодаря чему удается получить достаточно чистый газ. В других работах авторов [22, 23] удалось добиться дополнительного снижения содержания смолы в газе за счет подогрева топлива в шнековом питателе (торрификации).

Совместная газификация шлама с другими топливами позволяет повысить влажность перерабатываемого шлама. Например, в работах [24–26] сообщается о газификации древесины и шлама с влажностью 20 %. В работе [25] показано, что при переходе от шлама к смеси с содержанием древесных пеллет 30 % химический КПД возрастает с 20–30 до 30–50 %. Однако высокая доля шлама в смеси, помимо ухудшения характеристик газа и конверсии топлива, может привести к спеканию и снижению проницаемости слоя [2, 4]. Полученный газ содержит больше конденсата, поэтому требует дополнительной очистки.

В работе [27] были проведены эксперименты по газификации засыпок древесных пеллет и шлама сточных вод в реакторе периодического действия. Температурные измерения позволили обнаружить протекание волн химического превращения, связанных с выходом летучих и выгоранием твердого остатка. Эксперименты показали, что брикеты из шлама горят с большей температурой, чем древесные пеллеты, но с меньшей удельной скоростью. Устойчивый режим достигается при больших значениях избытка окислителя (порядка 0,6–0,8).

Высокая влажность шлама способствует автогазификации: при внешнем нагреве влага становится газифицирующим агентом [28, 29]. Способ газификации, в котором топливо (смесь шлама с древесной щепой) прогревалось в шнековом реакторе при температуре стенок 700–900 °С, был экспериментально исследован в работе [30]. Проведенные авторами измерения показывают, что повышение доли шлама ухудшает характеристики горючего газа, однако способствует более полной конверсии топливной смеси. Пирогазификация шлама во вращающемся реакторе (для устранения проблем со спеканием) проводилась также в работе [4], авторы которой сообщают о достижении КПДхим 67 % (за счет внешнего теплоподвода).

При математическом моделировании процессов газификации шлама и его смесей с другими твердыми топливами обычно используются равновесные термодинамические модели [18]. В работах [26, 31] предложены нестационарные зональные и пространственно одномерные модели, с помощью которых авторы исследовали переходные режимы в слоевых газогенераторах. Для процессов кипящего слоя применяют CFD-модели [32, 33]. В [34] авторы использовали несколько разных математических моделей: термодинамическую модель (с ограничениями на образование смолы и степень равновесности некоторых реакций) и трехмерную CFD-модель физико-химических процессов в пористой среде. Как показало сравнение результатов, детализация модели мало влияет на интегральные характеристики процесса, хотя и позволяет проанализировать картину течения и распределение температур в слое.

#### Математическая модель одномерного стационарного реактора

Рассматривается стационарный процесс газификации в однородном по сечению слое частиц. Высота реакционной зоны слоя составляет 0,25 м, внутренний диаметр реактора 0,2 м. Расход топлива равен 10 кг/ч, расход дутья (подогретый до 30 °С воздух) порядка нескольких нм<sup>3</sup>/ч. В качестве топлива используются смеси частиц азейского бурого угля (средний размер 2,5 см) и шлама (с тем же размером частиц). Состав и свойства компонентов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав и свойства угля и шлама

Table 1. Composition and properties of coal and sewage sludge

Характеристика Characteristic (%)	Уголь Coal	Шлам Sewage sludge
W <sup>r</sup>	10	10–40
A <sup>d</sup>	17	28,4
V <sup>daf</sup>	44	76
C <sup>daf</sup>	76,30	47,3
H <sup>daf</sup>	5,3	6,5
O <sup>daf</sup>	17,3	36,9
N <sup>daf</sup>	1,54	7,0
S <sup>daf</sup>	0,46	2,3
Размер частиц, см Particle size, cm	2,5	2,5



Уравнения, описывающие стационарный теплообмен в слое топлива, могут быть записаны следующим образом [35]:

$$\begin{aligned} \lambda^g \frac{dT^g}{dz^2} - C_p^g J^g \frac{dT^g}{dz} - \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) - \\ - \alpha_2 S_2 (T^g - T^w) + Q^g(z) = 0; \\ \lambda^f \frac{dT^f}{dz^2} - C_p^f J^f \frac{dT^f}{dz} + \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) - \\ - \alpha_3 S_2 (T^g - T^w) + Q^f(z) = 0; \\ \lambda^w \frac{dT^w}{dz^2} + \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) + \alpha_3 S_2 (T^g - T^w) = 0. \end{aligned}$$

Здесь  $T$  – температура, К;  $C_p$  – теплоемкость, Дж/кг/К;  $\lambda$  – эффективная теплопроводность, Вт/м/К;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>/К;  $J$  – массовый поток, кг/с;  $S_1$  – площадь теплообмена между газом и топливом, м<sup>2</sup>;  $S_2$  – площадь теплообмена между газом и стенкой, м<sup>2</sup>;  $Q$  – источник теплоты, Вт;  $z$  – пространственная координата (высота слоя), м; индексы  $f, g$  и  $w$  соответствуют топливу, газу и стенке.

Коэффициент теплопроводности газа в слое частиц равен коэффициенту теплопроводности чистого азота, дисперсионные эффекты учитывали по рекомендациям из работы [36]; теплоемкость газовой смеси рассчитывается как сумма теплоемкостей компонентов. Теплопроводность и теплоемкость обоих топлив рассчитываются по формулам из работы [37], для влажного топлива в принятом приближении выполняется аддитивность характеристик сухого топлива и свободной влаги. Коэффициент теплопроводности засыпки включает поправку на излучение [36]. Теплопроводность стальной стенки известна из справочных данных. Предполагается, что теплообмен между топливом и стенкой происходит только через излучение (контактный теплообмен пренебрежимо мал). Теплотери через стенку в окружающую среду не учитываются, однако учитывается переток теплоты из ядра горения в зоны подготовки топлива и газификации огарка [38]. Этот переток, впрочем, незначителен: исключение уравнения для температуры стенки мало влияет на основные характеристики процесса.

На входе в слой для температур топлива и газа выполняются условия Данквертса [39] (для упрощения считаем, что химические реакции на входной границе не протекают), а для стенки – граничные условия второго рода:

$$\begin{aligned} C_p^g J_0^g (T_0^g - T^g(0)) - \lambda^g \frac{dT^g}{dz} \Big|_{z=0} &= 0; \\ C_p^f J_0^f (T_0^f - T^f(0)) - \lambda^f \frac{dT^f}{dz} \Big|_{z=0} &= 0; \\ \frac{dT^w}{dz} \Big|_{z=0} &= 0. \end{aligned}$$

На выходе из слоя устанавливаются граничные условия второго рода для всех температур:

$$\frac{dT^g}{dz} \Big|_{z=L} = 0; \quad \frac{dT^f}{dz} \Big|_{z=L} = 0; \quad \frac{dT^w}{dz} \Big|_{z=L} = 0.$$

Для решения этой системы уравнений необходимо знать функции источников теплоты  $Q(z)$ . Обычно эти функции определяются кинетикой химических реакций. В настоящей работе применяется упрощенный кинетико-термодинамический подход для их расчета: учитывается кинетика гетерофазных реакций, а реакции в газовой фазе считаются равновесными [40].

При численном решении задачи реактор разбивается по оси на ряд элементов малого объема. Зная время пребывания газа в каждом из этих элементов, можно записать для выбранного  $i$ -го элемента функцию источника теплоты:

$$Q_i(z) = \frac{-\Delta H_i^r}{\tau_i} = \frac{(\sum h_j n_j^{in} - \sum h_j n_j^{out})}{\tau_i}.$$

Здесь  $\Delta H^r$  – изменение энтальпии компонентов в результате химических реакций, Дж;  $h_j$  – молярная энтальпия  $j$ -го компонент, Дж/моль;  $n_j$  – количество  $j$ -го компонента, моль;  $\tau$  – время контакта, с; индекс  $in$  относится к входящему потоку,  $out$  – к исходящему.

Таким образом, для вычисления функции источника (или стока) теплоты необходимо знать изменение компонентного состава системы в малом объеме. Расчет изменения химического состава происходит в две стадии. Сначала рассматриваются гетерогенные процессы: сушка, пиролиз и реакции углеродистого остатка с  $O_2$ ,  $CO_2$  и  $H_2O$ .

$$\begin{aligned} u_f \frac{dn_{H_2O}}{dz} &= \beta S_1 \left( C_{H_2O}^{eq} - \frac{n_{H_2O}}{V_g} \right); \\ u_f \frac{dn_v}{dz} &= -k_{pyr} n_v; \\ u_f \frac{dn_c}{dz} &= -k_{O_2}^{eff} S_1 \frac{n_{O_2}}{V_g} - k_{CO_2}^{eff} S_1 \frac{n_{CO_2}}{V_g} - k_{H_2O}^{eff} S_1 \frac{n_{H_2O}}{V_g}. \end{aligned}$$

Здесь  $u_f$  – линейная скорость движения топлива, м/с;  $V_g$  – порозный объем, м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент массообмена, м/с;  $C^{eq}$  – равновесная концентрация паров воды, моль/м<sup>3</sup> (определяется из табличных данных по равновесному давлению паров воды);  $k_{pyr}$  – константа скорости пиролиза, с<sup>-1</sup>;  $n_v$  – количество летучих веществ в топливе, моль;  $n_c$  – количество углерода топлива, моль;  $n_{O_2}$ ,  $n_{CO_2}$ ,  $n_{H_2O}$  – количество молей соответствующих веществ в порозном объеме, моль;  $S_1$  – площадь реакционной поверхности топлива, м<sup>2</sup>;  $k^{eff}$  – эффективная константа скорости гетерогенной реакции, м/с (нижний индекс относится к газифицирующему агенту). Эффективная константа скорости гетерогенной реакции  $k^{eff}$  определяется в квазистационарном приближении:

$$k^{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{k_0 e^{\frac{E}{RT}}}}.$$

Здесь  $k_0$  – предэкспонент, м/с;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль/К. Кинетические коэффициенты гетерогенных реакций приведены в табл. 2. Коэффициент межфазного массообмена для слоя частиц определяется по формуле [41]:

$$\beta = Nu_d \frac{D_g}{d} = 0,23 Re_d^{0,86} \frac{D_g}{d}.$$

Здесь  $Nu_d$  – диффузионное число Нуссельта;  $D_g$  – эффективный коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $d$  – средний размер частиц, м;  $Re_d$  – число Рейнольдса, построенное по среднему размеру частицы.

На второй стадии выделившиеся в результате сушки, пиролиза и газификации газы перемешиваются и реагируют между собой до достижения локального термохимического равновесия. Для этого используется блок минимизации энергии Гиббса [42]:

$$\mathbf{n}^{out} = \arg \min G(\mathbf{n});$$

$$G(\mathbf{n}) = \sum_{j=1}^N \left[ n_j \left( \mu_j^0 + RT \ln \frac{n_j}{\sum_{k=1}^N n_k} \right) \right];$$

$$\mathbf{A}\mathbf{n} = \mathbf{b};$$

$$n_j \geq 0.$$

Таким образом, для определения конверсии топлива используется система обыкновенных диффе-

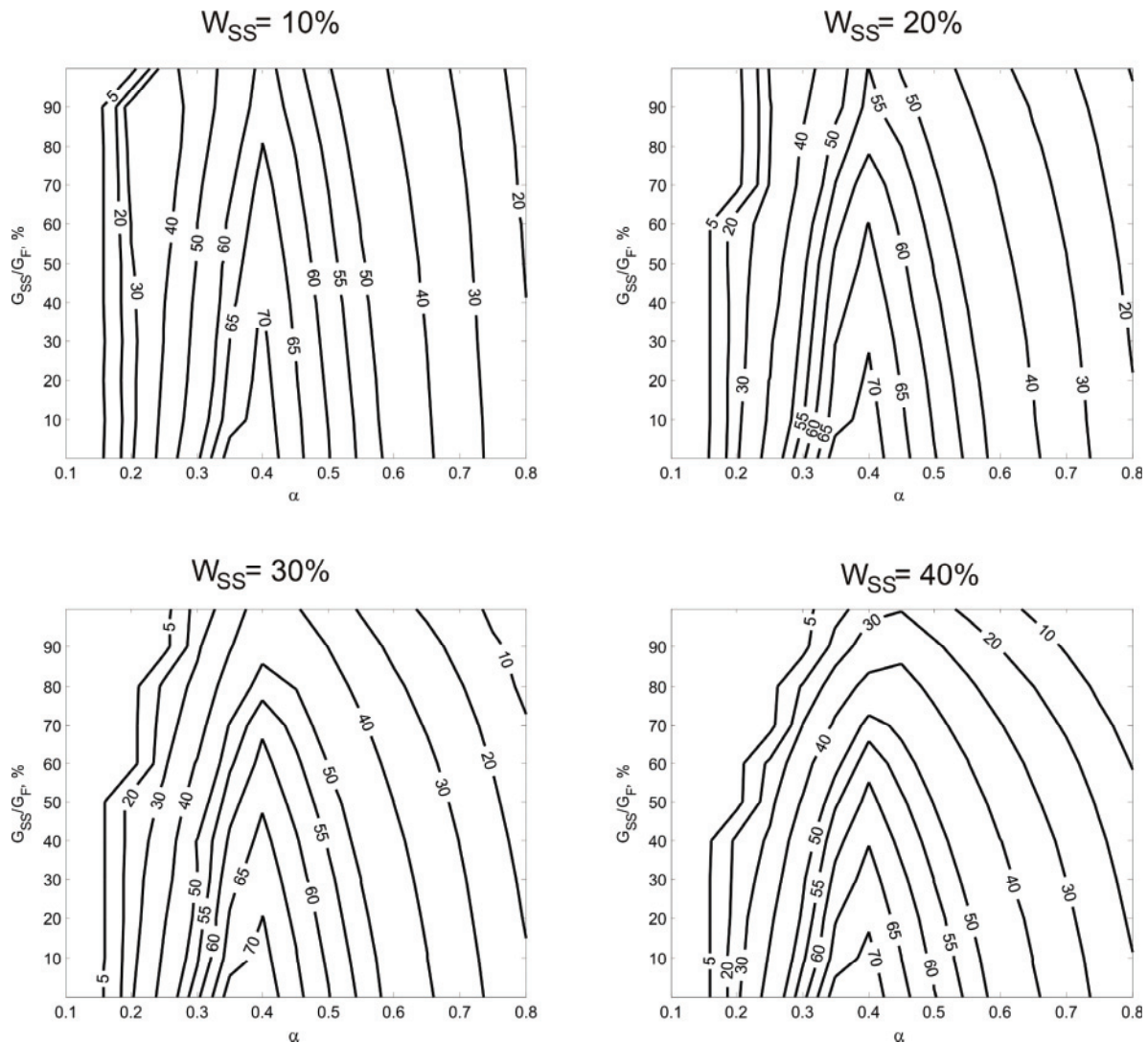


Рис. 1. Зависимость химического КПД процесса газификации (%) от избытка окислителя ( $\alpha$ ), доли шлама в смеси с углем ( $G_{SS}/G_F$ ) и его начальной влажности ( $W_{SS}$ )

Fig. 1. Dependence of cold gas efficiency of co-gasification (%) on air excess ratio ( $\alpha$ ), sewage sludge mass fraction in mixture with coal ( $G_{SS}/G_F$ ) and its initial moisture content ( $W_{SS}$ )

ренциальных уравнений; для определения состава газа используется равновесная субмодель. Итоговая разность энтальпий входит в виде источникового члена в уравнения теплопереноса [43, 44].

Таблица 2. Кинетические характеристики угля и шлама  
Table 2. Kinetics coefficients for coal and sewage sludge

Реакция Reaction	Древесина/Wood		Шлам/Sewage sludge	
	$k_0$	$E_a$ , кДж/моль (kJ/mole)	$k_0$	$E_a$ , кДж/моль (kJ/mole)
Пиролиз Pyrolysis	$3,35 \cdot 10^3, \text{с}^{-1}$	113,3	$2,7 \cdot 10^6, \text{с}^{-1}$	120
$\text{C} + \text{O}_2$	$4,88 \cdot 10^6, \text{м/с}$	177	$1,6 \cdot 10^6, \text{м/с}$	99
$\text{C} + \text{CO}_2$	$2,48 \cdot 10^{11}, \text{м/с}$	265,8	$2,7 \cdot 10^6, \text{м/с}$	218
$\text{C} + \text{H}_2\text{O}$	$1,76 \cdot 10^6, \text{м/с}$	180	$2,1 \cdot 10^6, \text{м/с}$	158

### Оптимизация процесса обращенной газификации смесей угля и шлама с разной влажностью

С помощью разработанной модели были проведены вариантные расчеты процесса совместной газификации угля и шлама. Диапазон условий: доля шлама в смеси с углем от 0 до 100 % мас. (с шагом 10 %); коэффициент избытка окислителя 0,1–0,8 (с шагом 0,05); начальная влажность шлама 10–40 % на рабочую массу (с шагом 10 %). Результаты расчетов приведены ниже в виде диаграмм, на которых изображены зависимости характеристик процесса от удельного расхода дутья и состава топлива (рис. 1–5). В качестве основного критерия эффективности выступает химический КПД (КПД<sub>хим</sub>, cold gas efficiency), равный доле теплотворной способности твердого топлива, перешедшей в теплотворную способность генераторно-

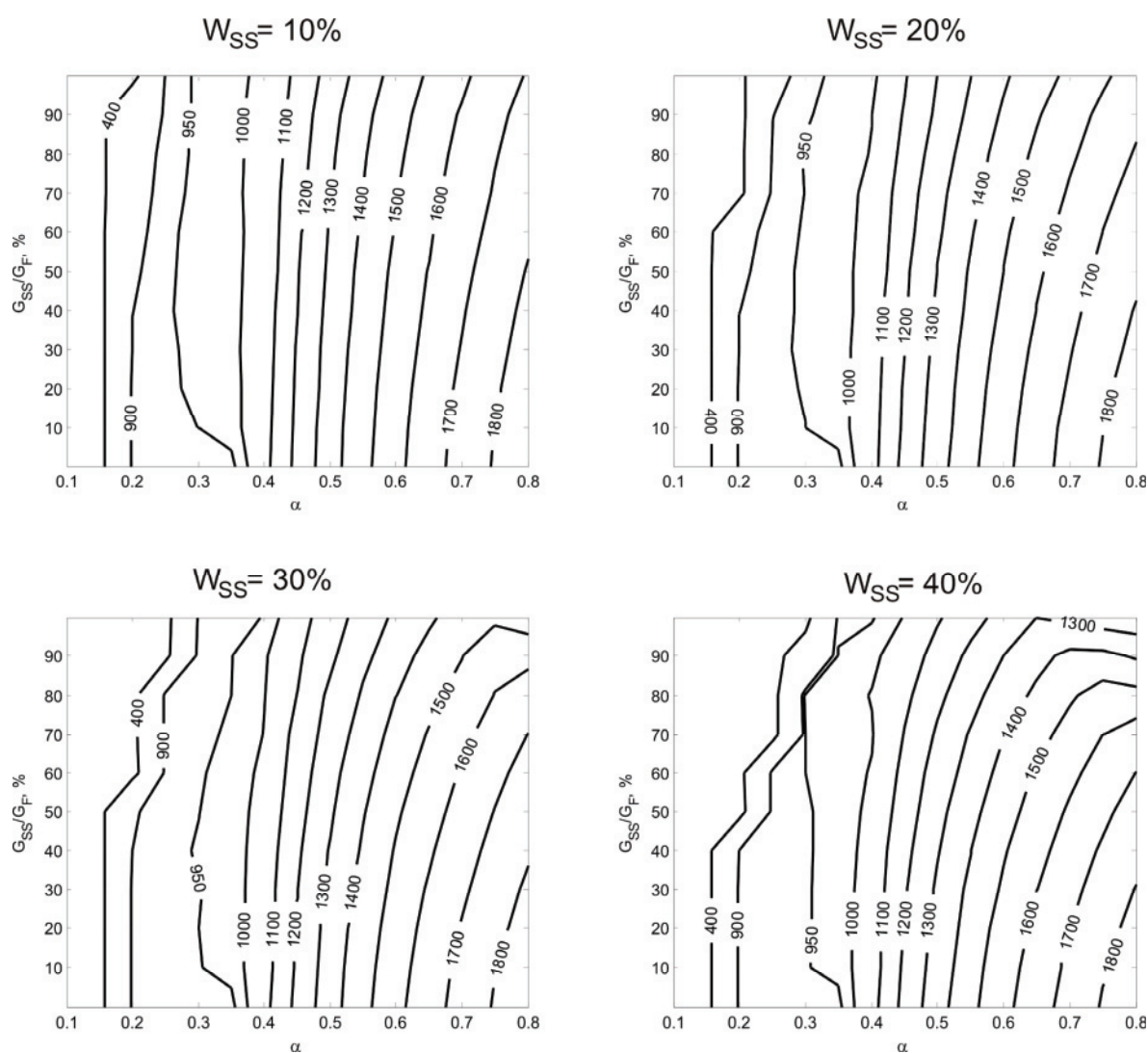


Рис. 2. Зависимость температуры генераторного газа (K) от избытка окислителя ( $\alpha$ ), доли шлама в смеси с углем ( $G_{SS}/G_F$ ) и его начальной влажности ( $W_{SS}$ )

Fig. 2. Dependence of output gas temperature (K) on air excess ratio ( $\alpha$ ), sewage sludge mass fraction in mixture with coal ( $G_{SS}/G_F$ ) and its initial moisture content ( $W_{SS}$ )



го газа. Поверхности КПД<sub>хим</sub> имеют экстремумы: при увеличении коэффициента избытка окислителя КПД<sub>хим</sub> сначала возрастает за счет окисления топлива с образованием горючих газов, затем достигает максимума (который близок к точке полной конверсии топливного углерода), после чего падает из-за окисления горючих газов [45].

Газификация бурого угля протекает с оптимальным КПД<sub>хим</sub> порядка 70 %. Сухой шлам (с влажностью 10 %) эффективно газифицируется даже без добавок угля, однако с ростом влажности КПД<sub>хим</sub> резко уменьшается. Шлам с влажностью 40 % скорее тлеет, чем горит: максимальная эффективность его конверсии составляет около 30 %. Температура выходящего из слоя генераторного газа резко возрастает при переходе от режимов окислительного пиролиза к газификации (рис. 2). При избытке

окислителя 0,4 газ имеет температуру порядка 950–1100 К.

Минимальное значение коэффициента избытка окислителя, при котором начинается газификация, определяет границу термической устойчивости процесса. Как видно из рис. 1, 2, для древесины и сухого шлама эта величина составляет около 0,2–0,25. С увеличением влажности газификация становится возможной при больших удельных расходах воздуха: при влажности шлама 30 и 40 % минимальный коэффициент избытка окислителя составляет около 0,3–0,4. Для газификации такого влажного топлива требуются большие затраты теплоты. Максимум КПД<sub>хим</sub> при этом смещается в сторону больших коэффициентов избытка окислителя, поскольку дожигание огарка при невысоких температурах требует окисления значительной части горючих газов.

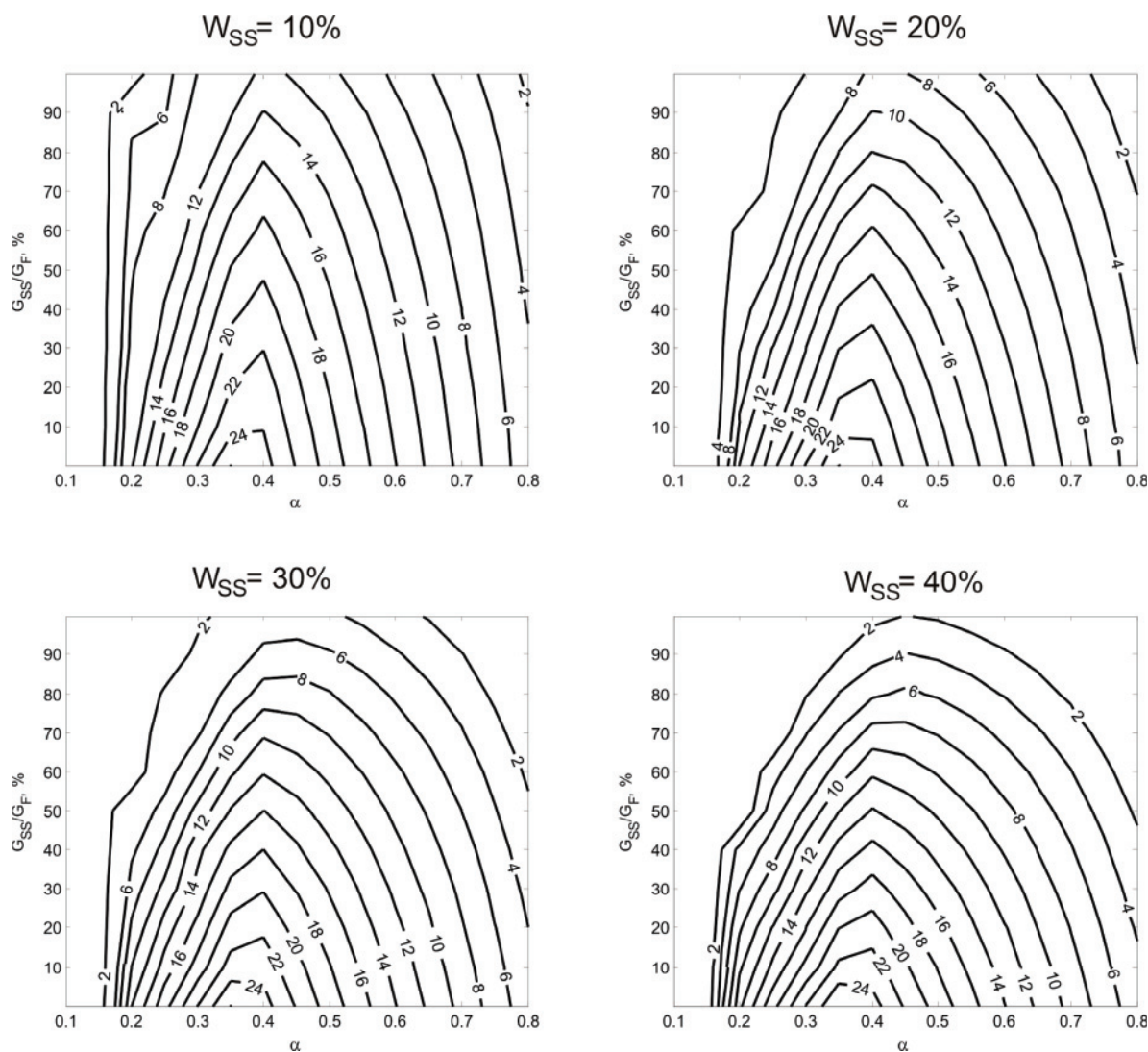


Рис. 3. Зависимость объемной концентрации CO в генераторном газе (%) от избытка окислителя ( $\alpha$ ), доли шлама в смеси с углем ( $G_{SS}/G_F$ ) и его начальной влажности ( $W_{SS}$ )

Fig. 3. Dependence of CO molar fraction (%) in output gas on air excess ratio ( $\alpha$ ), sewage sludge mass fraction in mixture with coal ( $G_{SS}/G_F$ ) and its initial moisture content ( $W_{SS}$ )



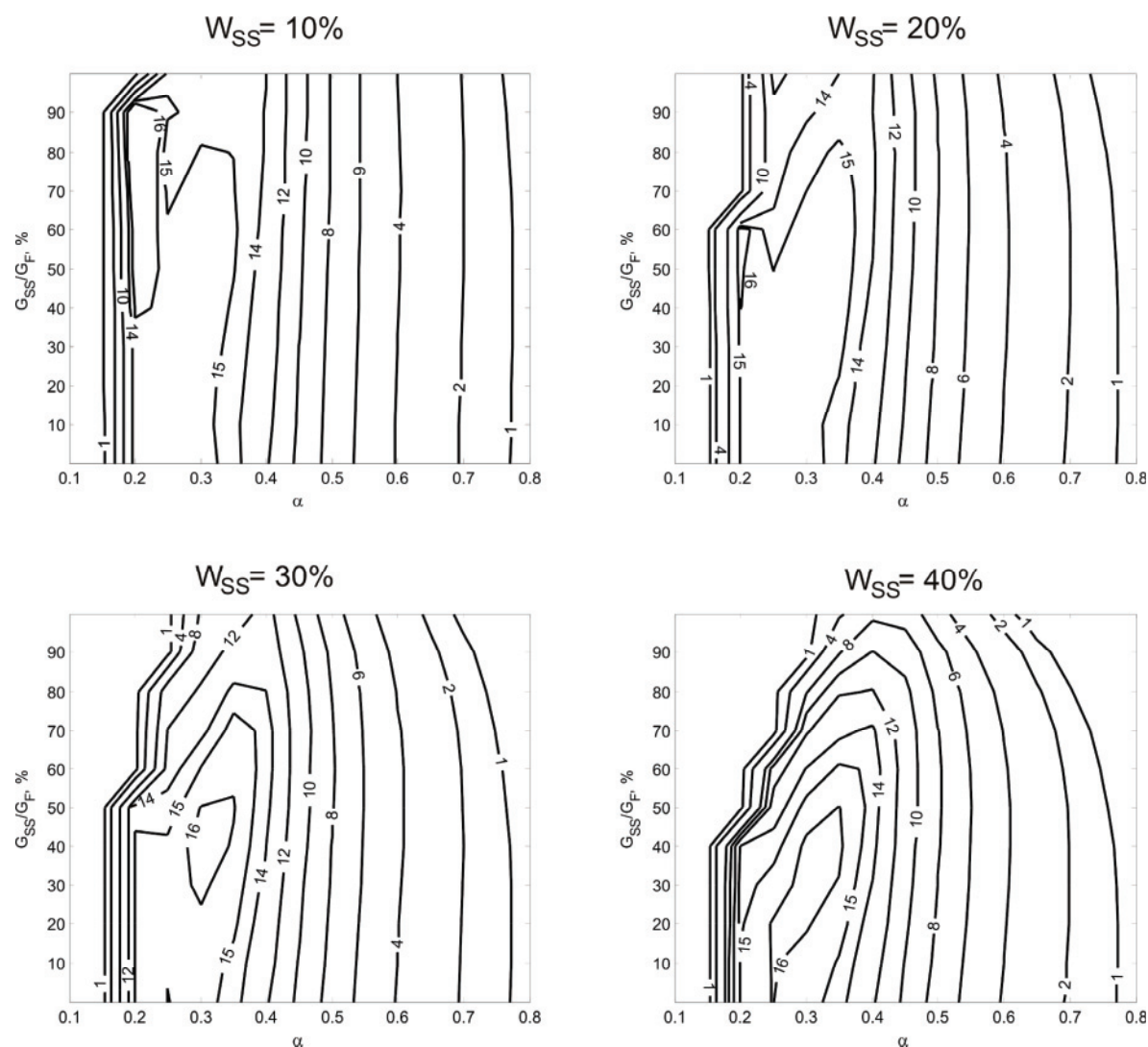
**Таблица 3.** Зависимость допустимой доли шлама в смеси с углем от его влажности

**Table 3.** Dependence of admissible sludge fraction in coal-sludge mixture on its mixture content

Минимальный КПД <sub>хим</sub> , % Minimum efficiency, %	Начальная влажность шлама, % Initial moisture of sludge, %	Максимальная доля шлама, % Maximum sludge fraction, %
60	10	100
	20	70
	30	60
	40	50
50	10	100
	20	100
	30	80
	40	70

Ограничиваясь минимальным значением КПД<sub>хим</sub> в 50–60 %, можно установить максимальную долю шлама в смеси для разных уровней

влажности. Эти значения приведены в табл. 3. В ряде случаев результаты математического моделирования показывают возможность газификации шлама без добавок угля. При влажности шлама, равной 40 %, его доля в смеси с углем может составлять не более 30–40 %. Эти значения выше известных из литературных данных по конверсии влажного шлама. Однако в математической модели не учитывается агломерация, которая часто упоминается в экспериментальных работах [26]. Образование агломератов особенно характерно для влажного топлива, поэтому границы эффективных режимов будут отличаться от представленных на рис. 1 и в табл. 3. Если провести такую границу на уровне 20–30 % (т. е. принять, что при такой доле шлама образующиеся агломераты не мешают работе газогенератора), можно оценить достижимый химический КПД для шламов разной влажности в смесях с углем: эти оценки приведены в табл. 4.



**Рис. 4.** Зависимость объемной концентрации  $H_2$  в генераторном газе (%) от избытка окислителя ( $\alpha$ ), доли шлама в смеси с углем ( $G_{SS}/G_F$ ) и его начальной влажности ( $W_{SS}$ )

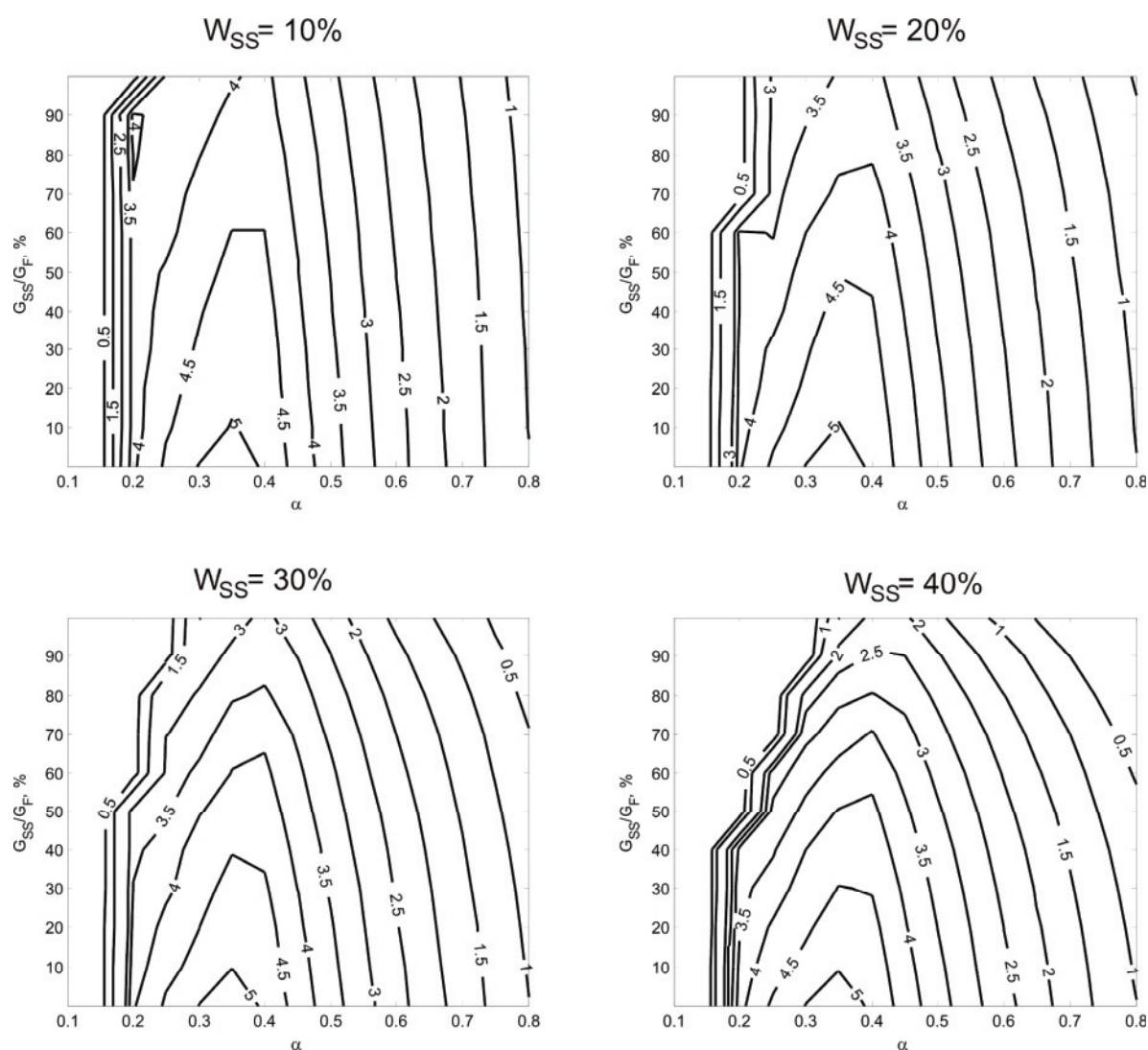
**Fig. 4.** Dependence of  $H_2$  molar fraction (%) in output gas on air excess ratio ( $\alpha$ ), sewage sludge mass fraction in mixture with coal ( $G_{SS}/G_F$ ) and its initial moisture content ( $W_{SS}$ )

**Таблица 4.** Химический КПД процесса газификации с ограничением на массовую долю шлама в смеси

**Table 4.** Cold gas efficiency of gasification constrained by sewage sludge mass fraction in coal-sludge mixture

Максимальная доля шлама, % Maximum sludge fraction, %	Начальная влажность шлама, % Initial moisture of sludge, %	Максимальный КПД <sub>хим</sub> , % Minimum efficiency, %
20	10	71.6
	20	70.9
	30	70.1
	40	69.3
30	10	70.8
	20	69.6
	30	68.4
	40	67.2

Расчетное содержание CO и H<sub>2</sub> в генераторном газе представлено на рис. 3, 4. Эти газы являются основными продуктами газификации, и по их отношению обычно определяют характеристики газа, поэтому остальные газы (азот, метан, сероводород) здесь не приводятся. Концентрация CO имеет единственный экстремум, соответствующий оптимальным условиям газификации бурого угля. Экстремум концентрации H<sub>2</sub> лежит в области промежуточных составов, и с увеличением влажности шлама положение экстремума смещается в сторону больших значений доли угля и коэффициента избытка окислителя, что можно связать с превращением влаги шлама в водяной пар, который выступает в качестве дополнительного газифицирующего агента [29].



**Рис. 5.** Зависимость теплотворной способности сухого генераторного газа (МДж/нм³) от избытка окислителя ( $\alpha$ ), доли шлама в смеси с углем ( $G_{SS}/G_F$ ) и его начальной влажности ( $W_{SS}$ )

**Fig. 5.** Dependence of dry gas heating value (MJ/Nm³) on air excess ratio ( $\alpha$ ), sewage sludge mass fraction in mixture with coal ( $G_{SS}/G_F$ ) and its initial moisture content ( $W_{SS}$ )

На рис. 5 приведены значения высшей теплотворной способности сухого генераторного газа (после конденсации и удаления влаги). Теплота сгорания сухого генераторного газа уменьшается с увеличением доли шлама и его влажности. Для угля без добавок шлама эта величина составляет около 5 МДж/нм<sup>3</sup>, для сухого шлама – около 3,5–4 МДж/нм<sup>3</sup>, для влажного шлама – менее 2 МДж/нм<sup>3</sup>. При газификации сухого шлама наблюдается два экстремума теплотворной способности от коэффициента избытка окислителя: при малых избытках окислителя (как видно из рис. 4, при этом образуется пирогаз с высоким содержанием водорода) и вблизи точки максимального химического КПД (образуется генераторный газ с высоким содержанием СО). Пиролиз влажного шлама неустойчив, поэтому при влажности 20–40 % наблюдается единственный экстремум теплотворной способности.

#### Выводы

Проведено расчетное исследование процесса совместной конверсии бурого угля и шлама сточных вод в обращенном газогенераторе. Расчеты проведены с использованием стационарной одномерной модели тепломассообмена в плотном слое с химиче-

скими реакциями. Анализ результатов математического моделирования показывает следующее:

- 1) При отсутствии явлений агломерации можно реализовать достаточно эффективный процесс газификации шлама с влажностью 10–20 % без добавок угля. Для шлама с влажностью 30–40 % конверсия без добавления угля протекает с низким химическим КПД. Доля шлама в смеси зависит от требуемого химического КПД и влажности: для достижения химического КПД=60 % максимальная доля шлама влажностью 40 % в смеси с углем составляет 50 %. Однако, если учесть спекание слоя, допустимая доля шлама, скорее всего, снизится.
- 2) Ограничивая долю шлама в смеси с углем до 20–30 %, можно оценить максимальный химический КПД совместной газификации. Химический КПД составляет около 60–70 % и уменьшается с ростом влажности шлама. Для всех рассмотренных случаев удастся найти области режимов с достаточной высокой теплотворной способностью газа (4–4,5 МДж/нм<sup>3</sup>).

Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations / S.S.A. Syed-Hassan, Y. Wang, S. Hu, S. Su, J. Xiang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 80. – P. 888–913.
2. Co-gasification and recent development on waste-to-energy conversion: a review / A. Ramos, E. Monteiro, V. Silva, A. Rouboa // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 81. – P. 380–398.
3. Werther J., Ogada T. Sewage sludge combustion // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1999. – V. 25. – P. 55–116.
4. Sewage sludge gasification in a bench scale rotary kiln / C. Freda, G. Cornacchia, A. Romanelli, V. Valerio, M. Grieco // *Fuel*. – 2018. – V. 212. – P. 88–94.
5. Wang Y., Yan L. CFD based combustion model for sewage sludge gasification in a fluidized bed // *Front. Chem. Eng. China*. – 2009. – V. 3. – № 2. – P. 138–145.
6. Conversion of municipal sewage sludge in supercritical water / A.A. Vostrikov, O.N. Fedyaeva, A.V. Shishkin, D.Yu. Dubov, M.Ya. Sokol // *Solid Fuel Chemistry*. – 2008. – V. 42. – № 6. – P. 384–393.
7. Urban D.L., Antal M.J. Jr. Study of the kinetics of sewage sludge pyrolysis using DSC and TGA // *Fuel*. – 1982. – V. 61. – P. 799–806.
8. Magdziarz A., Werle S. Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS // *Waste Management*. – 2014. – V. 34. – № 1. – P. 174–179.
9. Urych B., Smolinski A. Kinetics of Sewage Sludge Pyrolysis and Air Gasification of its Chars // *Energy Fuels*. – 2016. – V. 30. – № 6. – P. 4869–4878.
10. Heating process characteristics and kinetics of sewage sludge in different atmospheres / L.F. Calvo, M. Otero, B.M. Jenkins, A.I. Garcia, A. Moran // *Thermochimica Acta*. – 2004. – V. 409. – № 2. – P. 127–135.
11. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge / M.B. Folguers, R.M. Diaz, J. Xiberta, I. Prieto // *Fuel*. – 2003. – V. 82. – № 15–17. – P. 2051–2055.
12. Co-combustion of different sewage sludge and coal: a non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis / M. Otero, L.F. Calvo, M.V. Gil, A.I. Garcia, A. Moran // *Bioresource Technology*. – 2008. – V. 99. – № 14. – P. 6311–6319.
13. Magdziarz A., Wilk M. Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2013. – V. 114. – № 2. – P. 519–529.
14. Mechanisms and kinetics of granulated sewage sludge combustion / A. Kijo-Kleczkowska, K. Sroda, M. Kosowska-Golachowska, T. Musial, K. Wolski // *Waste Management*. – 2015. – V. 46. – P. 459–471.
15. Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass / A. Kijo-Kleczkowska, K. Sroda, M. Kosowska-Golachowska, T. Musial, K. Wolski // *Fuel*. – 2016. – V. 170. – P. 141–160.
16. Flame structures and ignition characteristics of torrefied and raw sewage sludge particles at rapid heating rates / C. Mock, H. Lee, S. Choi, V. Manovic // *Fuel*. – 2017. – V. 200. – P. 467–480.
17. Dogru M., Midilli A., Howarth C.R. Gasification of sewage sludge using a throatied downdraft gasifier and uncertainty analysis // *Fuel Processing Technology*. – 2002. – V. 75. – P. 55–82.
18. Petersen I., Werther J. Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2005. – V. 44. – № 7. – P. 717–736.
19. Air and air-steam gasification of sewage sludge. The influence of dolomite and throughput in tar production and composition / E. Roche, J.M. de Andres, A. Narros, M.E. Rodriguez // *Fuel*. – 2014. – V. 115. – P. 54–61.
20. Co-gasification of High-ash Sewage Sludge and Straw in a Bubbling Fluidized Bed with Oxygen-enriched Air / M. Niu, B. Jin, Y. Huang,



- H. Wang, Q. Dong, H. Gu, J. Yang // *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. – 2018. – Paper No. 20170044.
21. Mun T.-Y., Kim J.-S. Air gasification of dried sewage sludge in a two-stage gasifier. P. 2: Calcined dolomite as a bed material and effect of moisture content of dried sewage sludge for the hydrogen production and tar removal // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – V. 38. – № 13. – P. 5235–5242.
22. Gasification of dried sewage sludge in a newly developed three-stage gasifier: Effect of each reactor temperature on the producer gas composition and impurity removal / Y.-K. Choi, T.-Y. Mun, M.-H. Cho, J.-S. Kim // *Energy*. – 2016. – V. 114. – P. 121–128.
23. Choi Y.-K., Ko J.-H., Kim J.-S. Gasification of dried sewage sludge using an innovative three-stage gasifier: Clean and H<sub>2</sub>-rich gas production using condensers as the only secondary tar removal apparatus // *Fuel*. – 2018. – V. 216. – P. 810–817.
24. Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier / M. Seggiani, S. Vitolo, M. Puccini, A. Bellini // *Fuel*. – 2012. – V. 93. – P. 486–491.
25. Effect of sewage sludge content on gas quality and solid residues produced by cogasification in an updraft gasifier / M. Seggiani, M. Puccini, G. Raggio, S. Vitolo // *Waste Management*. – 2012. – V. 32. – № 10. – P. 1826–1834.
26. Co-gasification of woody biomass and sewage sludge in a fixed-bed downdraft gasifier / Z. Ong, Y. Cheng, T. Maneerung, Z. Yao, Y.W. Tong, C.-H. Wang, Y. Dai // *AIChEJ*. – 2015. – V. 61. – № 8. – P. 2508–2521.
27. Partial oxidation of sewage sludge briquettes in a updraft fixed bed / M. Kim, Y. Lee, J. Park, C. Ryu, T.-I. Ohm // *Waste Management*. – 2016. – V. 49. – P. 204–211.
28. Jarvinen M.P., Zevenhoven R., Vakkilainen E.K. Auto-gasification of a biofuel // *Combustion and Flame*. – 2002. – V. 131. – P. 357–370.
29. Расчетное исследование эффективности ступенчатого процесса газификации влажной древесины / И.Г. Донской, А.Н. Козлов, Д.А. Свищев, В.А. Шаманский // *Теплоэнергетика*. – 2017. – № 4. – С. 21–29.
30. Co-gasification of wet sewage sludge and forestry waste in situ steam agent / L. Peng, Y. Wang, Z. Lei, G. Cheng // *Bioresource Technology*. – 2012. – V. 114. – P. 698–702.
31. Seggiani M., Puccini M., Vitolo S. Gasification of sewage sludge: mathematical modelling of an updraft gasifier // *Chemical Engineering Transactions*. – 2013. – V. 32. – P. 895–900.
32. Petersen I., Werther J. Three-dimensional modeling of a circulating fluidized bed gasifier for sewage sludge // *Chemical Engineering Science*. – 2005. – V. 60. – № 16. – P. 4469–4484.
33. Wang Y., Yan L. CFD based combustion model for sewage sludge gasification in a fluidized bed // *Front. Chem. Eng. China*. – 2009. – V. 3. – № 2. – P. 138–145.
34. Model-Based Downdraft Biomass Gasifier Operation and Design for Synthetic Gas Production / W.-C. Yan, Y. Shen, S. You, S.H. Sim, Z.-H. Luo, Y.W. Tong, C.-H. Wang // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 178. – P. 476–493.
35. Донской И.Г. Моделирование процесса совместной газификации древесины и полимерных материалов в плотном слое // *Химия твердого топлива*. – 2018. – № 2. – С. 67–72.
36. Ковенский В.И., Теплицкий Ю.С. О теплопроводности зернистого слоя // *Инженерно-физический журнал*. – 2008. – Т. 81. – № 5. – С. 956–962.
37. Eisermann W., Johnson P., Conger W.L. Estimating thermodynamic properties of coal, char, tar and ash // *Fuel Processing Technology*. – 1980. – V. 3. – P. 39–53.
38. Фильтрационное горение системы углерод-инертный материал в режиме со сверхадиабатическим разогревом / Е.А. Салганский, В.М. Кислов, С.В. Глазов, А.Ф. Жолудев, Г.Б. Манелис // *Физика горения и взрыва*. – 2008. – Т. 44. – № 3. – С. 30–38.
39. Теплицкий Ю.С., Ковенский В.И. О постановке граничных условий и условий сопряжения для задач теплопереноса в зернистых слоях на основе двухтемпературной модели // *Инженерно-физический журнал*. – 2006. – Т. 79. – № 6. – С. 98–106.
40. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation / I.G. Donskoy, V.A. Shamansky, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev // *Combustion Theory and Modelling*. – 2017. – V. 21. – № 3. – P. 529–559.
41. Чуханов З.Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 480 с.
42. Kaganovich B.M., Keiko A.V., Shamansky V.A. Equilibrium thermodynamic modeling of dissipative macroscopic systems / Ed. by D.H. West, G. Yablonsky // *Advances in chemical engineering*. V. 39. Thermodynamics and kinetics of complex systems. – New York: Elsevier, 2010. – P. 1–74.
43. Ковенский В.И. Об одном методе расчета слоевого горения коксового остатка твердого топлива // *Теоретические основы химической технологии*. – 2012. – Т. 46. – № 2. – С. 216–228.
44. Кузватов И.А., Гроо А.А., Степанов С.Г. Численное моделирование физико-химических процессов в слоевом газификаторе // *Вычислительные технологии*. – 2005. – Т. 10. – № 5. – С. 39–48.
45. Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G. From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency // *Energy*. – 2007. – V. 32. – P. 1248–1259.

Поступила 16.06.2018 г.

#### Информация об авторах

**Донской И.Г.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории термодинамики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

UDC 662.7

## MATHEMATICAL MODELING OF COAL AND SEWAGE SLUDGE CO-CONVERSION USING DOWNDRAFT GASIFIER

Igor G. Donskoy,  
donskoy.chem@mail.ru

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS,  
130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to utilize municipal waste. The utilization of combustible waste, such as sewage sludge, can be combined with energy production for small-scale consumers. One of the ways of such utilization can be gasification, which makes it possible to obtain combustible gas suitable for thermal and electric energy production.

**The aims** of the study are: to evaluate the efficiency of sewage sludge co-conversion with higher quality fuel (brown coal) based on the results of mathematical modeling under different process conditions (oxidizer excess ratio, fuel mixture composition, initial moisture of sewage sludge); to estimate the admissible fraction of sewage sludge in the mixture with coal.

**Object** of the study is downdraft brown coal and sewage sludge co-gasification process.

**Research method:** mathematical simulation of the process of fixed bed thermochemical conversion of solid fuels using the stationary one-dimensional model developed earlier by the author.

**Results.** The authors have evaluated the dependencies of gasification characteristics (cold gas efficiency, composition and calorific value of gas) on specific air consumption, sewage sludge mass fraction (0–100 %) and raw sewage sludge moisture content (10–40 %). They determined the maximum values of sewage sludge fraction in the mixture with coal at a fixed chemical efficiency of 60–70 %, and the maximum values of the cold gas efficiency at a fixed sludge fraction level of 20–30 % in the mixture with coal (in order to avoid bed agglomeration). With sludge moisture content of 40 %, its maximum fraction in a mixture with coal can reach 50 % (with agglomeration excluded). The moisture contained in the slurry evaporates and reacts as an additional gasifying agent. When the sludge fraction is limited to 20–30 %, the efficiency of gasification falls insignificantly compared with pure coal.

### Key words:

Gasification, coal, sewage sludge, mathematical modelling, cold gas efficiency.

This work was performed in the course of scientific project III.17.1.2 of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences fundamental researches program, registration number AAAA-A17-117030310448-0.

### REFERENCES

1. Syed-Hassan S.S.A., Wang Y., Hu S., Su S., Xiang J. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 80, pp. 888–913.
2. Ramos A., Monteiro E., Silva V., Rouboa A. Co-gasification and recent development on waste-to-energy conversion: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81, pp. 380–398.
3. Werther J., Ogada T. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, vol. 25, pp. 55–116.
4. Freda C., Cornacchia G., Romanelli A., Valerio V., Grieco M. Sewage sludge gasification in a bench scale rotary kiln. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 88–94.
5. Wang Y., Yan L. CFD based combustion model for sewage sludge gasification in a fluidized bed. *Front. Chem. Eng. China*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 138–145.
6. Vostrikov A.A., Fedyayeva O.N., Shishkin A.V., Dubov D.Yu., Sokol M.Ya. Conversion of municipal sewage sludge in supercritical water. *Solid Fuel Chemistry*, 2008, vol. 42, no. 6, pp. 384–393.
7. Urban D.L., Antal M.J. Jr. Study of the kinetics of sewage sludge pyrolysis using DSC and TGA. *Fuel*, 1982, vol. 61, pp. 799–806.
8. Magdziarz A., Werle S. Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS. *Waste Management*, 2014, vol. 34, no. 1, pp. 174–179.
9. Urych B., Smolinski A. Kinetics of Sewage Sludge Pyrolysis and Air Gasification of its Chars. *Energy Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4869–4878.
10. Calvo L.F., Otero M., Jenkins B.M., Garcia A.I., Moran A. Heating process characteristics and kinetics of sewage sludge in different atmospheres. *Thermochimica Acta*, 2004, vol. 409, no. 2, pp. 127–135.
11. Folguers M.B., Diaz R.M., Xiberta J., Prieto I. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge. *Fuel*, 2003, vol. 82, no. 15–17, pp. 2051–2055.
12. Otero M., Calvo L.F., Gil M.V., Garcia A.I., Moran A. Co-combustion of different sewage sludge and coal: A non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, no. 14, pp. 6311–6319.
13. Magdziarz A., Wilk M. Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, vol. 114, no. 2, pp. 519–529.
14. Kijo-Kleczkowska A., Sroda K., Kosowska-Golachowska M., Musial T., Wolski K. Mechanisms and kinetics of granulated sewage sludge combustion. *Waste Management*, 2015, vol. 46, pp. 459–471.
15. Kijo-Kleczkowska A., Sroda K., Kosowska-Golachowska M., Musial T., Wolski K. Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass. *Fuel*, 2016, vol. 170, pp. 141–160.
16. Mock C., Lee H., Choi S., Manovic V. Flame structures and ignition characteristics of torrefied and raw sewage sludge particles at rapid heating rates. *Fuel*, 2017, vol. 200, pp. 467–480.
17. Dogru M., Midilli A., Howarth C.R. Gasification of sewage sludge using a throat-draft gasifier and uncertainty analysis. *Fuel Processing Technology*, 2002, vol. 75, pp. 55–82.
18. Petersen I., Werther J. Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2005, vol. 44, no. 7, pp. 717–736.
19. Roche E., de Andres J.M., Narros A., Rodriguez M.E. Air and air-steam gasification of sewage sludge. The influence of dolomite

- and throughput in tar production and composition. *Fuel*, 2014, vol. 115, pp. 54–61.
20. Niu M., Jin B., Huang Y., Wang H., Dong Q., Gu H., Yang J. Co-gasification of high-ash sewage sludge and straw in a bubbling fluidized bed with oxygen-enriched air. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2018, paper no. 20170044.
  21. Mun T.-Y., Kim J.-S. Air gasification of dried sewage sludge in a two-stage gasifier. P. 2: Calcined dolomite as a bed material and effect of moisture content of dried sewage sludge for the hydrogen production and tar removal. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, no. 13, pp. 5235–5242.
  22. Choi Y.-K., Mun T.-Y., Cho M.-H., Kim J.-S. Gasification of dried sewage sludge in a newly developed three-stage gasifier: Effect of each reactor temperature on the producer gas composition and impurity removal. *Energy*, 2016, vol. 114, pp. 121–128.
  23. Choi Y.-K., Ko J.-H., Kim J.-S. Gasification of dried sewage sludge using an innovative three-stage gasifier: Clean and H<sub>2</sub>-rich gas production using condensers as the only secondary tar removal apparatus. *Fuel*, 2018, vol. 216, pp. 810–817.
  24. Seggiani M., Vitolo S., Puccini M., Bellini A. Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier. *Fuel*, 2012, vol. 93, pp. 486–491.
  25. Seggiani M., Puccini M., Raggio G., Vitolo S. Effect of sewage sludge content on gas quality and solid residues produced by cogasification in an updraft gasifier. *Waste Management*, 2012, vol. 32, no. 10, pp. 1826–1834.
  26. Ong Z., Cheng Y., Maneerung T., Yao Z., Tong Y.W., Wang C.-H., Dai Y. Co-gasification of woody biomass and sewage sludge in a fixed-bed downdraft gasifier. *AIChE Journal*, 2015, vol. 61, no. 8, pp. 2508–2521.
  27. Kim M., Lee Y., Park J., Ryu C., Ohm T.-I. Partial oxidation of sewage sludge briquettes in a updraft fixed bed. *Waste Management*, 2016, vol. 49, pp. 204–211.
  28. Jarvinen M.P., Zevenhoven R., Vakkilainen E.K. Auto-gasification of a biofuel. *Combustion and Flame*, 2002, vol. 131, pp. 357–370.
  29. Donskoy I.G., Kozlov A.N., Svishchev D.A., Shamanskiy V.A. Raschetnoe issledovanie effektivnosti stupenchatogo protsesssa gazifikatsii vlazhnoy drevesiny [Numerical investigation of the staged gasification of wet wood]. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 4, pp. 258–264.
  30. Peng L., Wang Y., Lei Z., Cheng G. Co-gasification of wet sewage sludge and forestry waste in situ steam agent. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 114, pp. 698–702.
  31. Seggiani M., Puccini M., Vitolo S. Gasification of sewage sludge: mathematical modelling of an updraft gasifier. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, vol. 32, pp. 895–900.
  32. Petersen I., Werther J. Three-dimensional modeling of a circulating fluidized bed gasifier for sewage sludge. *Chemical Engineering Science*, 2005, vol. 60, no. 16, pp. 4469–4484.
  33. Wang Y., Yan L. CFD based combustion model for sewage sludge gasification in a fluidized bed. *Front. Chem. Eng. China*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 138–145.
  34. Yan W.-C., Shen Y., You S., Sim S.H., Luo Z.-H., Tong Y.W., Wang C.-H. Model-based downdraft biomass gasifier operation and design for synthetic gas production. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 178, pp. 476–493.
  35. Donskoy I.G. Modelirovanie protsesssa sovmestnoy gazifikatsii drevesiny i polimernykh materialov v plotnom sloe [Simulation of co-gasification of wood and polymeric materials in a fixed bed]. *Solid Fuel Chemistry*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 121–127.
  36. Kovenskiy V.I., Teplitskiy Yu.S. O teploprovodnosti xernistogo solya [On thermal conductivity of a blown granular bed]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 81, no. 5, pp. 998–1005.
  37. Eisermann W., Johnson P., Conger W.L. Estimating thermodynamic properties of coal, char, tar and ash. *Fuel Processing Technology*, 1980, vol. 3, pp. 39–53.
  38. Salgansky E.A., Kislov V.M., Glazov S.V., Zhuludev A.F., Manelis G.B. Filtratsionnoe gorenie sistemy uglerod – inertny material v rezhime so sverkhadiabatcheskim razogrevom [Filtration combustion of a carbon-inert material system in the regime with superadiabatic heating]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 273–280.
  39. Teplitskiy Yu.S., Kovenskiy V.I. O postanovke granichnykh uslovy i uslovy sopryazheniya dlya zadach teploperenosa v zernistykh sloyakh na osnove dvukhtemperaturnoy modeli [Statement of boundary and conjugation conditions for problems of heat transfer in granular beds on the basis of a two-temperature model]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2006, vol. 79, no. 6, pp. 1147–1156.
  40. Donskoy I.G., Shamansky V.A., Kozlov A.N., Svishchev D.A. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation. *Combustion Theory and Modelling*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 529–559.
  41. Chukhanov Z.F. *Nekotorye problemy topliva i energetiki* [Some problems of fuel and energy]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1961. 480 p.
  42. Kaganovich B.M., Keiko A.V., Shamansky V.A. Equilibrium thermodynamic modeling of dissipative macroscopic systems. *Advances in Chemical Engineering. Vol. 39: Thermodynamics and kinetics of complex systems*, 2010, pp. 1–74.
  43. Kovenskiy V.I. Ob odnom metode rascheta teplovogo goreniya koksovogo ostatka tverdogo topliva [Method of calculating the bed combustion of a solid fuel coke residue]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2012, vol. 46, no. 2, pp. 180–192.
  44. Kuzovatov V.I., Groo A.A., Stepanov S.G. Numerical modelling of physico-chemical processes in fixed-bed gasifier. *Computational technologies*, 2005, vol. 10, no. 5, pp. 39–48. In Rus.
  45. Prins M.J., Ptasiński K.J., Janssen F.J.J.G. From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency. *Energy*, 2007, vol. 32, pp. 1248–1259.

Received: 16 June 2018.

#### Information about the authors

**Igor G. Donskoy**, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS.

УДК 621.926:34.16

## ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ЧАСТИЦ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПУЛЬПЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ НА БАЗЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ВОЛН ЛЭМБА

Моркун Владимир Станиславович<sup>1</sup>,  
morkunv@gmail.com

Моркун Наталья Владимировна<sup>1</sup>,  
nmorkun@gmail.com

Троне Виталий Валериевич<sup>1</sup>,  
vtron@ukr.net

Грищенко Светлана Николаевна<sup>1</sup>,  
s-grischenko@ukr.net

Бровко Дмитрий Викторович<sup>2</sup>,  
brovko@i.ua

Паранюк Дмитрий Игоревич<sup>3</sup>,  
paranyuk@i.ua

Сердюк Александра Юрьевна<sup>1</sup>,  
o.serdiuk@i.ua

<sup>1</sup> Криворожский национальный университет,  
Украина, 50027, г. Кривой Рог, ул. Виталия Матусевича, 11.

<sup>2</sup> Академия горных наук Украины,  
Украина, 50002, г. Кривой Рог, ул. Пушкина, 37.

<sup>3</sup> ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»,  
Украина, 50000, г. Кривой Рог, ул. Криворожстали, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения точности средств ультразвукового оперативного контроля характеристик твердой фазы железорудной пульпы в процессе обогащения. Данное направление совершенствования средств контроля позволит повысить эффективность управления процессом обогащения и качество конечной продукции.

**Цель:** повышение точности измерений плотности частиц твердой фазы пульпы на основе закономерностей распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами, в процессе их естественного и специально организованного перемещения.

**Объекты:** процессы распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами.

**Методы:** систематизация и анализ разработанных методов ультразвукового контроля характеристик твердой фазы гетерогенных неоднородных сред, методы математической статистики и теории вероятностей для обработки результатов экспериментов, компьютерные информационные и программные технологии для реализации разработанных подходов.

**Результаты.** Выявленные закономерности распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами, в процессе их естественного и специально организованного перемещения позволяют определить плотность частиц твердой фазы, которая при известной их крупности и концентрации в контролируемом объеме характеризует степень раскрытия полезного компонента (минерала). Разработана схема устройства контроля плотности твердой фазы суспензий на основе полученных закономерностей. Погрешность измерений плотности частиц твердой фазы пульпы составляет 1–3 %.

### Ключевые слова:

Обогащение руды, волны Лэмба, гамма-излучение, неразрушающий контроль, характеристики пульпы.

### Введение

Для контроля характеристик рудного материала в технологических потоках линии обогащения разработан ряд методов и способов. Среди существующих подходов достаточно широкое применение нашли методы, основанные на применении ультразвуковых волн [1–9]. Преимуществом данного подхода является относительно большая кон-

центрация энергии в волне вследствие малой величины слоя ее локализации, а также возможность получения ультразвукового сигнала из любой точки среды распространения [2].

Из известных типов ультразвуковых волн наиболее изученными являются волны Релея [1–3], распространяющиеся вдоль границы твердого пространства. Волны данного типа обладают наиболь-



шей концентрацией энергии, однако существенно зависят от состояния поверхности распространения. Аналогичны по своей природе волны Лява [4, 5]. Этот тип волн отличается сильной зависимостью от состояния неоднородности поверхностного слоя, что делает весьма нестабильными измерительные поверхности, по которым они распространяются. К основным типам ультразвуковых волн относят волны Стоунли [1]. Волны Стоунли распространяются как в жидком, так и твердом полупространствах. Поэтому их составляющая, распространяющаяся в жидком полупространстве, подвержена воздействию тех же возмущающих факторов, что и обычные объемные ультразвуковые колебания.

Поскольку стенки технологических емкостей, как правило, изготавливаются из листового металла, при реализации ультразвукового контроля параметров контактирующих с ними сред целесообразно использовать волны Лэмба [1, 6–9]. Данный тип волн характеризуется значительной концентрацией энергии, и в меньшей степени они подвержены воздействию возмущающих факторов. Вместе с тем при разработке методов и средств контроля параметров газосодержащих суспензий важной задачей является определение степени влияния параметров исследуемой среды на величину затухания волн Лэмба.

В значительном количестве случаев при разработке методов ультразвукового контроля характеристик технологических сред используют ультразвуковые волны Рэлея, Лява и Стоунли. Однако использование данных типов волн усложняется необходимостью выполнения ряда существенных ограничений. В частности, ограничения связаны с состоянием поверхности распространения волн и наличием газовых пузырьков в исследуемой среде. Применение волн Лэмба позволяет устранить указанные недостатки. При этом для расширения спектра контролируемых параметров перспективным и актуальным направлением исследования является комбинирование ультразвуковых методов контроля с радиометрическими.

#### **Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Результаты исследования оптимизации процесса обогащения железной руды, изложенные в работах [10–12], позволили сделать вывод о том, что показатели эффективности управления процессами обогащения рудного сырья существенно зависят от точности оперативной информации о параметрах технологических процессов.

В работе [13] представлены результаты исследований диссипации акустических колебаний в жидкостях в условиях наличия газовых пузырьков. Полученная модель позволяет прогнозировать параметры нелинейного затухания ультразвуковых волн. Следует отметить, что прогнозируемые значения демпфирования намного выше значений, оцененных аналогичными моделями.

Результаты исследований закономерностей распространения ультразвуковых колебаний в жидкости в условиях кавитационного режима представлены в работе [14]. С использованием численных методов определена рассеиваемая газовыми пузырьками энергия. В результате получена прямая зависимость между энергией, которую теряют пузырьки, и величиной затухания ультразвуковых волн, следствием чего является формирование бегущих волн. На основе представленных выше результатов в [15] осуществлен расчет силы Бьеркнеса и выполнено прогнозирование формируемых вследствие воздействия бегущих волн структуры пузырьков газа.

Исследования нелинейных процессов распространения ультразвуковых колебаний в воде при неоднородном распределении газовых пузырьков представлены в работе [16]. С помощью дифференциальных уравнений, которые описывают связь акустического поля и вибрации пузырьков, выполнен синтез математической модели. Сделано предположение о том, что затухание и нелинейные эффекты обусловлены исключительно наличием пузырьков. Следует отметить, что неоднородность распределения пузырьков представлена в виде скопления пузырьков газа, которые могут действовать как акустические экраны и влияют на поведение ультразвуковых волн.

В работе [17] для описания процесса распространения ультразвука в пузырьковых жидкостях использован численный подход. Полученная модель основана на методах конечного объема и конечных разностей. Данный подход позволяет решить дифференциальную систему, образованную волновым уравнением и уравнение Рэлея–Плессета, которая связывает поле звукового давления с колебаниями пузырьков газа. Результаты данного исследования позволяют наблюдать ряд физических эффектов, вызванных наличием газовых пузырьков в жидкости: дисперсия, затухание, нелинейность.

В работе [18] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распространения ультразвуковых колебаний в жидкостях при наличии газовых пузырьков. Рассмотренный подход к моделированию процесса распространения ультразвука предполагает неравномерный характер поля давления вне пузырьков. Количественная оценка нестабильности пузырьков оценена с применением аналитических методов.

В работе [19] как средство неразрушающего контроля использованы многомодовые волны Лэмба. На основе измерения характеристик различных мод в экспериментальных кривых дисперсии волн Лэмба и сопоставления их с теоретическими кривыми получены оценки ряда физических параметров исследуемой среды. Следует отметить, что кривые дисперсии волн Лэмба зависят только от параметров пластины, частоту и фазовую скорость можно нормировать относительно скорости сдвиговой волны и толщины слоя исследуемой среды.



В работе [20] также отмечено, что волны Лэмба являются наиболее широко используемыми ультразвуковыми волнами для контроля различных сред. Однако теоретический анализ распространения управляемой волны представляет собой сложную задачу. Рассмотрен метод моделирования локального взаимодействия при распространении волн в металлических структурах. Следует отметить, что использование предложенного метода усложняется сосуществованием, по крайней мере, двух высокодисперсионных мод на любой заданной частоте.

Преимущество волн Лэмба в сфере неразрушающего контроля, как отмечено в работе [21], среди множества ультразвуковых волн заключается в том, что они могут проверять большую площадь с минимальным количеством приемников. Поскольку волны Лэмба являются диспергирующими, рекомендуется использовать синусоидальный сигнал эмиссии. Моделирование волн Лэмба было выполнено с использованием программного обеспечения ATILA.

Метод контроля параметров жидких сред с применением ультразвуковых волн Лэмба представлен в работе [22]. Показано, что изменение характеристик волн может быть использовано как функция, зависящая от уровня жидкости. Отмечается, что для определения оптимальных условий измерения параметров жидкой среды с использованием волн Лэмба необходимо провести дополнительные исследования.

Метод моделирования распространения ультразвуковых волн в условиях неоднородных гетерогенных сред рассмотрен в работах [23, 24]. Для формирования управляемых ультразвуковых волн при контроле характеристик рудной пульпы предложено использовать фазированные решетки. Развитие данного подхода и использование полученных результатов измерений для формирования оптимального управления обогащательными процессами представлено в работах [25–28].

Для исследования вещества с целью получения его элементного состава предложен спектроскопический метод, основанный на определении и последующем анализе спектра, возникающего при облучении исследуемого материала рентгеновским излучением. Применение данного метода к анализу состава железных руд представлено в работах [29, 30]. Приведенные результаты показали возможность измерения содержания железа в пробах сухой руды в диапазоне от 28 до 70 абс. %. Однако применение данного метода для оперативного контроля характеристик рудного материала по всей протяженности линии обогащения усложняется необходимостью выполнения специальной подготовки проб руды и значительным временем измерений. Например, рентгенофлуоресцентный анализатор последовательно-параллельного типа Axios-Minerals с набором синтетических стандартов WROXI (Wide Range Oxides) [31] позволяет анализировать пробы, состоящие из частиц, меньших,

чем измеряемые длины волн, имеющие ровную поверхность и определенную толщину. При этом длительность измерения содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  составляет 16 с. Описанный метод не позволяет оценить распределение анализируемого компонента по гранулометрической характеристике измельченной руды.

Для практической реализации этого метода контроля в работе необходимо решить ряд вопросов, связанных с определением параметров источника излучения. К таким параметрам относят следующие: энергия источника излучения, размеры коллиматоров источника и детектора излучения, оценку влияния рассеянного излучения фона, выбор режима работы детектора и др. Выбор энергии источника излучения целесообразно основывать на количественных критериях, связанных с определением диапазона изменения сигнала, обусловленного возможными вариациями плотности и состава твердой фазы пульпы, а также чувствительности метода к таким изменениям. В работе [32] получены зависимости линейного коэффициента поглощения гамма-квантов от содержания железа при различных значениях энергии излучения, которые определяют конструктивные особенности радиометрического измерительного канала.

Выполненный анализ литературных источников показал, что в большинстве случаев при разработке методов неразрушающего контроля характеристик неоднородных гетерогенных сред используются ультразвуковые и радиометрические методы. Наиболее часто для этих целей используются поверхностные ультразвуковые волны Лява, Стоуни, Рэлея и Лэмба. Выбор конкретного типа волн для решения поставленных задач требует учета ряда строгих требований и ограничений, налагаемых как на характеристики поверхности распространения, так и на свойства контролируемой среды. Для определения характеристик газосодержащих суспензий перспективным является использование волн Лэмба. Вместе с тем измерение характеристик частиц измельченной руды различных минералогических разновидностей в технологических потоках рудообогащательной фабрики целесообразно осуществлять с применением радиометрических методов.

#### Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение точности измерений плотности частиц твердой фазы пульпы на основе закономерностей распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами, в процессе их естественного и специально организованного перемещения.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

- установить закономерности распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по по-

верхностям, контактирующим с этими средами;

- разработать схему и выполнить расчет параметров основных компонентов устройства контроля плотности твердой фазы суспензии с использованием радиометрического измерительного канала.

#### Материалы и методы исследования

Одним из важнейших параметров, оказывающих определяющее влияние на качественно-количественные показатели разделительных обогатительных технологий, является степень раскрытия минералов на каждом этапе технологического процесса.

На рис. 1 в качестве примера приведена зависимость результатов разделения рудных частиц от их размера, рассчитанная по методу П.В. Лященко [33, 34], для магнетитовой пульпы, содержащей смесь минеральных зерен и их сростков, условно разделенных на четыре категории: зерна чистого магнетита (1) – 72 % Fe; богатые сростки (2) – 52,6 % Fe; сростки (3) – 33,1 % и бедные сростки (4) – 13,4 % Fe. Каждая из этих категорий разбита на десять классов по крупности  $r$  от 10 до 100 мкм.

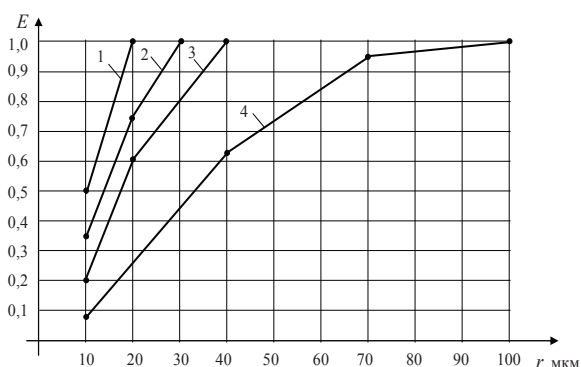


Рис. 1. Зависимость результатов разделения рудных частиц от их размера: 1 – зерна чистого магнетита; 2 – богатые сростки; 3 – сростки; 4 – бедные сростки

Fig. 1. Dependence of separation results on particle size: 1 are the pure magnetite grains; 2 are the rich splices; 3 are the splices; 4 are the poor splices

Из приведенных зависимостей видно, что разделительная способность обогатительного аппарата напрямую зависит от степени раскрытия минералов, что и определяет задачу оперативной оценки этого параметра. Эта задача осложняется тем фактом, что в реальных условиях на обогатительную фабрику поступает руда нескольких минеральных разновидностей. Без решения этой задачи невозможно эффективное управление технологическим процессом обогащения руды. Перспективным направлением при разработке средств оперативного контроля характеристик измельченной руды в пульпе являются ультразвуковые методы.

Степень раскрытия минералов (полезного компонента) тесно связана с плотностью частиц измельченного материала определенного класса

крупности, т. е. контроль степени раскрытия минералов может быть осуществлен путем измерения плотности частиц известного размера.

Рассмотрим способ оценки плотности частиц твердой фазы пульпы, основанный на использовании измерительных каналов на базе гамма-излучения и ультразвуковых поверхностных волн Лэмба.

На рис. 1 приведена схема, поясняющая конструкцию канала на базе гамма-излучения.

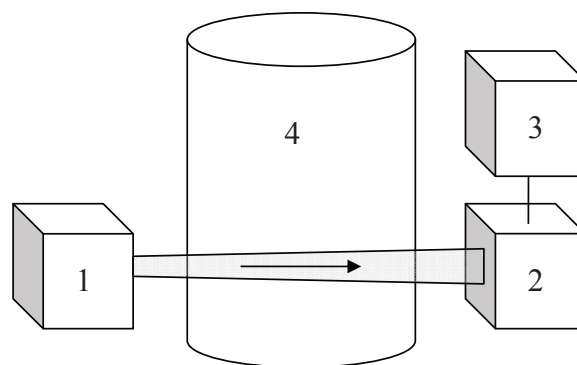


Рис. 2. Блок-схема измерительного канала на базе гамма-излучения: 1 – источник гамма-излучения; 2 – детектор гамма-излучения (ионизационная камера); 3 – логарифмический усилитель тока; 4 – измерительный модуль (пульпопровод)

Fig. 2. Block diagram of the measuring channel based on gamma radiation: 1 is the source of gamma radiation; 2 is the gamma-ray detector (ionization chamber); 3 is the logarithmic current amplifier; 4 is the measuring module (slurry line)

Введем обозначения:  $I$  – интенсивность гамма-излучения за измерительным модулем;  $I_0$  – интенсивность гамма-излучения в отсутствие пульпы (жидкости) в измерительном модуле (пульпопроводе).

Коэффициент ослабления гамма-излучения пульпой можно представить в виде следующего выражения

$$\mu = (1 - W)\rho_t\mu_t + W\rho_b\mu_b,$$

где  $\mu_b$  и  $\mu_t$  – массовые коэффициенты ослабления воды и твердого компонента пульпы;  $\rho_b$  и  $\rho_t$  – плотность воды и твердых частиц пульпы;  $W$  – объемная доля твердых частиц в пульпе.

Если источник излучения коллимирован, то детектор – 2 будет в основном регистрировать нерассеянное излучение, интенсивность которого можно представить в виде

$$I = I_0 \exp\{-(1 - W)\rho_t\mu_t + W\rho_b\mu_b\}l, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность гамма-излучения при отсутствии пульпы (жидкости) в измерительном модуле (пульпопроводе).

Если в измерительном модуле находится чистая вода, тогда интенсивность гамма-излучения будет определяться по формуле

$$I^* = I_0 \exp\{-\rho_b\mu_b l\}. \quad (2)$$

Как видно из формул (1) и (2), интенсивность излучения можно представить в виде

$$I = I^* \exp\{-W[\rho_t \mu_t - \rho_b \mu_b]l\}. \quad (3)$$

Величина тока детектора гамма-излучения пропорциональна интенсивности излучения, поэтому величина сигнала  $S$  на выходе логарифмического усилителя будет пропорциональна  $\ln I$ . Из формулы (3) видно, что разность сигналов  $S$  и  $S^*$  ( $S^*$  – сигнал по чистой воде) будет определяться по формуле

$$S_\gamma = S^* - S = \ln(I^*/I) = AW[\rho_t \mu_t - \rho_b \mu_b]l,$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности.

Как показано в [35], такая разность сигналов, полученных на основании измерений величины затухания волн Лэмба дает величину, которая также пропорциональна объемной доле  $W$ , т. е.

$$S_L = BW[\rho_t - \rho_b]Z.$$

Найдем отношение сигналов  $S_L$  и  $S_\gamma$

$$S = \frac{S_L}{S_\gamma} = \frac{BZ(\rho_t - \rho_b)}{Al(\rho_t \mu_t - \rho_b \mu_b)}. \quad (4)$$

Как видно из формулы (4), полученный таким образом сигнал будет зависеть только от средней плотности твердого  $\rho_t$ .

Для практической реализации этого способа контроля необходимо решить ряд вопросов, связанных с определением энергии источника излучения, размеров коллиматоров источника и детектора излучения, оценкой влияния рассеянного излучения фона, выбором режима работы детектора и т. д. Выбор энергии источника излучения должен быть основан на количественных критериях, связанных с определением диапазона изменения сигнала, обусловленного возможными вариациями плотности и состава твердой фазы пульпы, а также чувствительности метода к таким изменениям.

Для анализа указанного вопроса рассмотрим двухкомпонентный состав твердой фазы пульпы, состоящей, например, из  $\eta$ -й доли магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и  $(1-\eta)$ -й доли окиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ). В этом случае плотность твердой фазы пульпы находится по формуле

$$\rho_t = \rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta),$$

а формируемый сигнал  $S$  определяется выражением

$$S = A \frac{[\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta)][\eta \mu_1 + (1 - \eta) \mu_2] - \rho_{\%} \mu_{\%}}{\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta) - \rho_{\%}}, \quad (5)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – массовые коэффициенты ослабления  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{SiO}_2$  соответственно.

Критерием чувствительности метода может служить величина  $\frac{1}{S} \left| \frac{\partial S}{\partial \rho_t} \right|$ , показывающая относительное изменение сигнала при единичном изменении плотности твердого, которая для случая (9) вычисляется по формуле

$$\frac{1}{S} \left| \frac{\partial S}{\partial \rho_t} \right| = \frac{\left( [\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta)][\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta) - \rho_a] \times \right. \\ \left. \times (\mu_1 - \mu_2) + (\rho_1 - \rho_2) \rho_a \right)}{\left( (\rho_1 - \rho_2) \times \right. \\ \left. \times \{ [\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta)][\eta \mu_1 + (1 - \eta) \mu_2] - \rho_b \mu_b \} \right)} \times \\ \times \frac{[\mu_{\%} - \eta \mu_1 + (1 - \eta) \mu_2]}{[\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta) - \rho_{\%}]}. \quad (6)$$

Рассчитанные по формулам (5) и (6) зависимости сигнала  $S$  и величины  $\frac{1}{S} \left| \frac{\partial S}{\partial \rho_t} \right|$  от объемной до-

ли магнетита в твердом  $\eta$  для различных энергий источника излучения приведены на рис. 3, 4. Из рис. 3 видно, что с уменьшением энергии источника излучения увеличивается диапазон изменения сигнала  $S$ , а также повышается чувствительность метода. Если диапазон изменения сигнала существенно изменяется с уменьшением энергии гамма-квантов, то чувствительность метода не столь заметно реагирует на изменение энергии фотонов. Тем не менее энергию фотонов нежелательно выбирать более 80–100 кэВ из-за сокращения диапазона изменения сигнала  $S$ , а при энергии фотонов  $E \geq 275$  кэВ применение этого метода невозможно, так как зависимость  $S$  от плотности твердого становится неоднозначной.

$S$ , отн. ед.

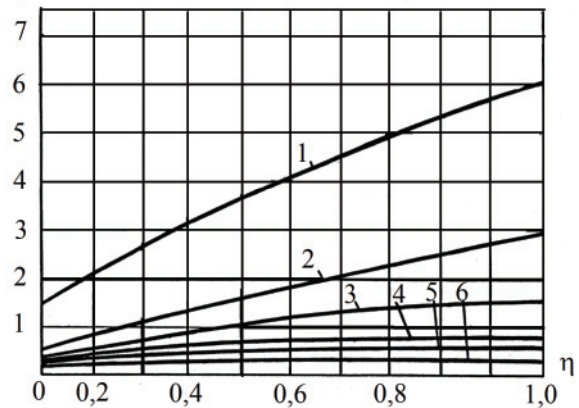


Рис. 3. Зависимость формируемого сигнала  $S$  от соотношения компонент твердого  $\eta$  для различных энергий источника излучения: 1 –  $E=30$  кэВ; 2 –  $E=40$  кэВ; 3 –  $E=50$  кэВ; 4 –  $E=60$  кэВ; 5 –  $E=70$  кэВ; 6 –  $E=80$  кэВ

Fig. 3. Dependence of the generated signal  $S$  on the ratio of the components of solid  $\eta$  for different energies of the radiation source: 1 –  $E=30$  keV; 2 –  $E=40$  keV; 3 –  $E=50$  keV; 4 –  $E=60$  keV; 5 –  $E=70$  keV; 6 –  $E=80$  keV

Из известных изотопов, энергия излучения которых лежит в указанном диапазоне, наиболее подходящим является источник изотопа  $^{241}_{95}\text{Am}$ ,



имеющий пиковое значение энергии 60 кэВ. Другим возможным источником может служить  $^{170}_{69}\text{Tu}$  с энергией фотонов 84 кэВ, однако данный изотоп имеет небольшой период полураспада – 129 дней, что недостаточно для эксплуатации в промышленных условиях.

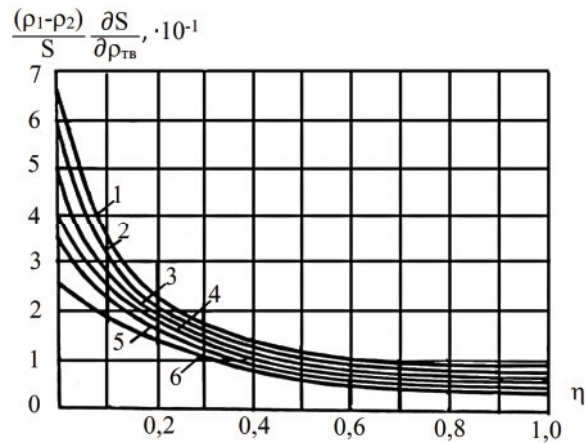


Рис. 4. Зависимость функции чувствительности от долевого содержания компонент твердой фазы при различных энергиях  $\gamma$ -излучения: 1 –  $E=30$  кэВ; 2 –  $E=40$  кэВ; 3 –  $E=50$  кэВ; 4 –  $E=60$  кэВ; 5 –  $E=70$  кэВ; 6 –  $E=80$  кэВ

Fig. 4. Dependence of sensitivity function on fractional content of the components of the solid phase at different  $\gamma$ -radiation energies: 1 –  $E=30$  keV; 2 –  $E=40$  keV; 3 –  $E=50$  keV; 4 –  $E=60$  keV; 5 –  $E=70$  keV; 6 –  $E=80$  keV

Измерительный модуль представляет собой цилиндрическую трубу и должен быть изготовлен из материала с малым атомным номером, например из полимерных материалов, таких как полиуретан и т. п. Такой выбор материала обусловлен тем, чтобы поглощение фотонов в стенках измерительного модуля было невелико.

При определении размеров модуля (диаметр трубы) нужно исходить из того, чтобы ослабление излучения при переходе от воды к пульпе, с предельно допустимым содержанием твердого, не превышало 10-кратной величины. Это соответствовало бы ослаблению сигнала радиометрического канала не более 20 дБ. В этом случае расчет линейных размеров измерительного модуля должен осуществляться по формуле

$$D = \frac{\ln 10}{W \{ [\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta)] [\eta \mu_1 + (1 - \eta) \mu_2] - \rho_{\%} \mu_{\%} \}}, \quad (7)$$

где  $W$  – объемная доля твердого в пульпе.

В соответствии с расчетами, выполненными по формуле (7), средний размер диаметра трубы измерительного модуля был выбран равным 70 мм. Последующие расчеты производились для измерительного модуля этого размера.

Для отсекающего рассеянного излучения, возникающего в основном за счет комптоновского взаимодействия фотонов в контролируемом объеме, используют коллиматоры и детектор излучения. Размеры коллиматоров, с одной стороны, определяются по влиянию рассеянного излу-

чения фона, с другой стороны – по эффективности регистрации излучения. Оба фактора по-разному сказываются на выборе размера коллиматоров

### Результаты исследования

Увеличение диаметров цилиндрических коллиматоров повышает эффективность регистрации излучения, но сокращает время экспозиции, при этом увеличивается влияние рассеянного излучения.

На рис. 5 изображена геометрия коллиматоров, источника и измерительного модуля. Определение размеров коллиматоров сводится к определению толщины  $L$  и диаметра отверстия коллиматора  $D$  (рис. 5). Выбор этих величин осуществляется в два этапа. На первом этапе расчеты по выявлению роли рассеянного излучения проводились при заполнении измерительного модуля водой, так как при таком заполнении формируется опорный сигнал, который используется в дальнейшем при определении плотности твердого. Поэтому точность определения этого сигнала может существенно образом сказываться на дальнейших измерениях.

На втором этапе расчеты проводились для исследуемой среды, находящейся в измерительном модуле, соответствующей пульпе с различным объемным содержанием твердого и различным составом твердого материала.

В качестве критерия влияния роли рассеянного излучения выбирался дозовый фактор накопления  $B_D$ , который определяется по формуле

$$B_D = \frac{D_0 + D_s}{D_0} = 1 + \frac{D_s}{D_0}, \quad (8)$$

где  $D_0$  и  $D_s$  – мощность экспозиционной дозы нерассеянного и рассеянного излучений.

Из формулы (8) видно, что величина  $B_D - 1$  определяет долю рассеянного по отношению к нерассеянному излучению, зарегистрированному детектором.

Расчеты по определению величины  $B_D$  осуществлялись методом Монте-Карло. Этот метод основан на определении характеристик полей излучения или показаний детекторов в поле излучения путем статистического моделирования процесса переноса излучений. Основной характеристикой поля излучения является дифференциальная по углам и энергиям плотность потока частиц  $\Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ , которая находится из решения кинетического уравнения Больцмана, имеющего в интегральном представлении вид [36]

$$\begin{aligned} \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) = & \int d\vec{r}' \int d\vec{\Omega}' \int dE' \frac{\exp(-\tau(\vec{r}', \vec{r}, E))}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} \times \\ & \times \sum_s (\vec{r}', \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E \rightarrow E) \times \\ & \times \Phi(\vec{r}', \vec{\Omega}', E') \delta\left(\vec{\Omega} - \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Показание детектора с функцией чувствительности  $D(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  в поле излучения, описываемом функцией  $\Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ , определяется функционалом

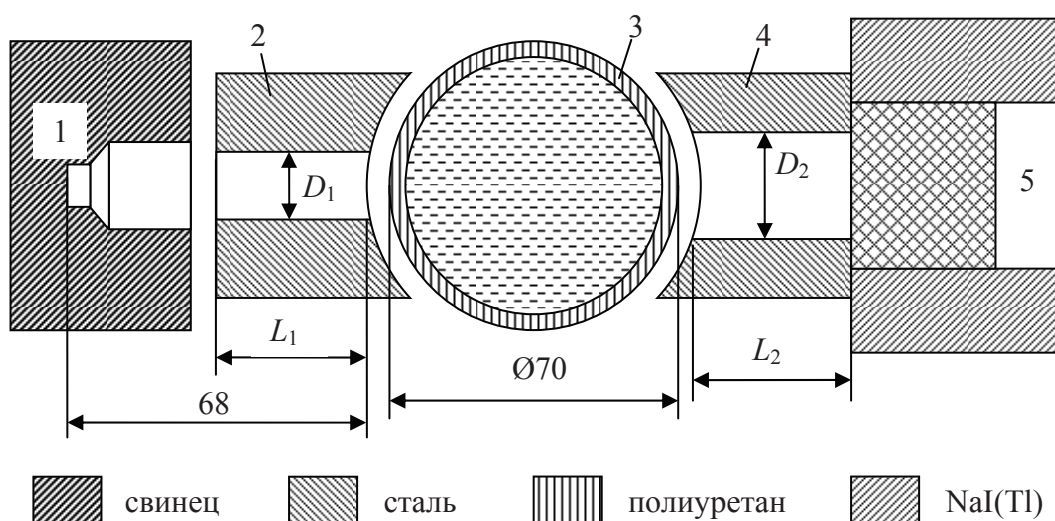


Рис. 5. Зависимость геометрии измерительного тракта радиометрического канала: 1 – источник; 2 – коллиматор источника; 3 – измерительный модуль; 4 – коллиматор детектора; 5 – сцинтиляционный детектор

Fig. 5. Dependence of measuring channel geometry in the radiometric channel: 1 is the source; 2 is the source collimator; 3 is the measuring module; 4 is the detector collimator; 5 is the scintillation detector

$$I = \int d\vec{r} \int d\Omega \int dE \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) D(\vec{r}, \vec{\Omega}, E). \quad (10)$$

Таким образом, задачи, связанные с распространением излучения в веществе, сводятся к оценке функционала (10) от решения уравнения переноса (9).

Способ расчета функционала (10) методом Монте-Карло заключается в вычислении на марковской цепи случайной величины  $\xi$ , математическое ожидание (среднее значение) которой равно искомому функционалу, т. е.

$$M\xi = I = \int d\vec{r} \int d\Omega \int dE \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) D(\vec{r}, \vec{\Omega}, E).$$

Для вычисления случайной величины  $\xi$  строится Марковская цепь  $x_0, x_1, \dots, x_v$  с начальной плотностью распределения  $\pi(x_0)$  и переходной плотностью  $P(x, x')$ .

На этой цепи оценивается случайная величина  $\xi$

$$\xi = \sum_{i=0}^v q_i D(x_i),$$

где  $v$  – случайный номер обрыва Марковской цепи;  $q_i$  – веса, определяемые по формулам

$$q_i = \omega(x_i, x_{i+1}) q_{i-1};$$

$$\omega(x_i, x_{i+1}) = \frac{K(x_i, x_{i+1})}{P(x_i, x_{i+1})}; \quad q_0 = \frac{S(x_0)}{\pi(x_0)},$$

где  $S(x)$  – функция плотности источников излучения;  $K(x_i, x_{i+1})$  – ядро интегрального уравнения (9);  $P(x_i, x_{i+1})$  – функция плотности перехода, с помощью которой моделируется Марковская цепь.

Для повышения эффективности расчета методом Монте-Карло использовались неаналоговые методы моделирования с применением локальной оценки [36].

Как уже отмечалось, на первом этапе расчеты проводились по чистой воде в измерительном модуле. Изменениям подвергался диаметр коллиматоров источника  $D_1$ , а также диаметр и толщина коллиматора детектора  $D_2$  и  $L_2$ . В таблице приведены значения факторов накопления для вариантов с различными геометрическими размерами указанных величин.

Таблица. Значения факторов накопления

Table. Values of accumulation factors

Номер варианта Variant number	$D_1$	$D_2$	$L_2$	$B_D$
	мм (mm)			
1	4,2	10	40	1,0007
2	8,5	20	40	1,0032
3	7,0	20	80	1,0011
4	3,5	10	80	1,0003

Как видно из таблицы, для любого из вариантов доля рассеянного излучения фона при формировании опорного сигнала не превышает 0,5 %, поэтому выбор геометрических размеров коллиматоров можно осуществлять по эффективности регистрации излучения, что соответствует наиболее благоприятному случаю варианта 2.

На втором этапе вычислений определялась зависимость  $B_D$  при заполнении измерительного модуля пульпой с различным объемным содержанием и составом твердого. Объемная доля твердой фазы пульпы изменялась от 0 до 0,25, а содержание полезного компонента в твердом от 20 до 60 %. На рис. 6 приведена зависимость фактора накопления  $B_D$  от объемной доли твердого при разном содержании полезного компонента в твердой фазе.

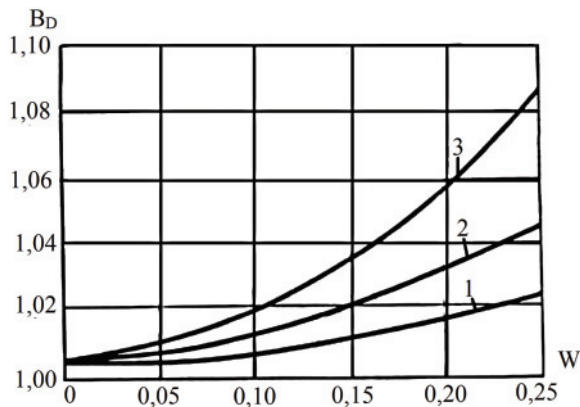


Рис. 6. Зависимость фактора накопления  $B_D$  от объемного содержания твердого в пульпе

Fig. 6. Dependence of factor  $B_D$  accumulation on the volume of solid content in the pulp

Как видно из рис. 6, вклад рассеянного излучения в показания детектора возрастает до 8,5 %. Однако даже в этом самом неблагоприятном случае рассеянное излучение не влияет заметным образом на величину формируемого сигнала  $S$ . Это видно из рис. 7, где приведена зависимость идеального сигнала  $S$ , рассчитанного без учета рассеянного излучения фона, и реального – с учетом последнего. Разница между этими сигналами не превышает 1,5 %, однако даже эта величина не является истинным критерием, так как экспериментальная градуировочная кривая определяется не в идеальных условиях, а при наличии рассеянного излучения фона, она должна лежать где-то между этими кривыми и поэтому реальная погрешность, вносимая рассеянным излучением фона, не превысит 1 %, что является вполне приемлемым, так как другие факторы, например изменение элементного состава твердого, могут оказывать большее влияние на точность измерений.

В заключение приведем идеальные градуировочные зависимости формируемого сигнала измерений  $S$  от плотности твердого компонента  $\rho$  для различных энергий источника излучения (рис. 8). В реальном диапазоне изменения плотности твердой фазы ( $\rho_s=2,5-4,5$  г/см<sup>3</sup>) для энергии источника 50 кэВ приведена градуировочная кривая для другого элементного состава твердого, с существенным различием плотности составляющих компонентов. Даже в этом случае, при вариации элементного состава твердого в указанных пределах, определение плотности твердого по усредненной градуировочной кривой будет содержать погрешность, не превышающую 5 %.

В качестве детектора излучения используется сцинтилляционный метод регистрации. Сцинтилляционные детекторы состоят из комбинации сцинтиллятора с фотоэлектрическим умножителем (ФЭУ). При попадании света на фотокатод из него выбиваются фотоэлектроны и усиленный ФЭУ ток попадает на анод фотоумножителя. Дальнейшая схема может либо измерять среднюю силу

анодного тока ФЭУ (токовый режим работы), либо регистрировать отдельные импульсы света (счетный режим работы).

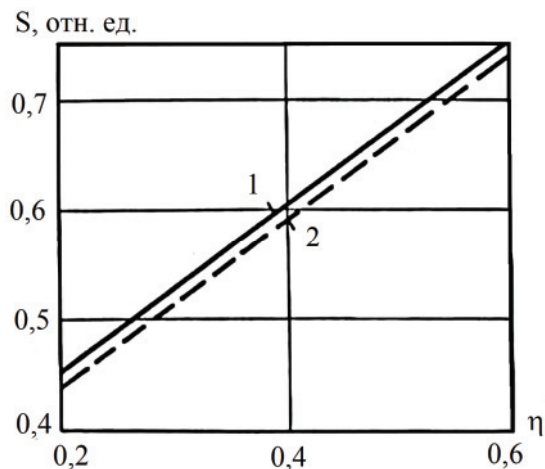


Рис. 7. Зависимость формируемого сигнала  $S$  твердой фазы пульпы  $\eta$ : 1 – без учета рассеянного излучения; 2 – с учетом рассеянного излучения фона при объемном содержании твердого  $W=0,25$

Fig. 7. Dependence of the generated signal  $S$  of the pulp solids  $\eta$ : 1 – without taking into account the scattered radiation; 2 – taking into account the scattered background radiation at a solid content  $W=0,25$

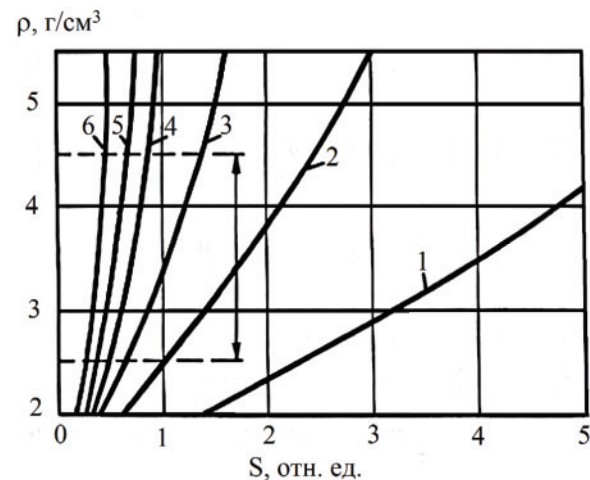


Рис. 8. Градуировочные кривые для различных энергий  $\gamma$ -излучения: 1 –  $E=30$  кэВ; 2 –  $E=40$  кэВ; 3 –  $E=50$  кэВ; 4 –  $E=60$  кэВ; 5 –  $E=70$  кэВ; 6 –  $E=80$  кэВ

Fig. 8. Grading curves for various  $\gamma$ -radiation energies: 1 –  $E=30$  keV; 2 –  $E=40$  keV; 3 –  $E=50$  keV; 4 –  $E=60$  keV; 5 –  $E=70$  keV; 6 –  $E=80$  keV

В токовом режиме работы сила анодного тока ФЭУ при постоянной энергии фотонов пропорциональна мощности дозы. При толщине сцинтиллятора  $d$  отношение силы анодного тока  $I$  ФЭУ к мощности дозы  $D$  определяется следующим образом

$$\frac{I}{D} = C \frac{\mu_{\text{сц}}}{\mu_{\text{воз}}} \frac{1 - \exp(-\mu_{\text{сц}} \rho_{\text{сц}} d)}{\mu_{\text{сц}} \rho_{\text{сц}} d},$$

где  $\mu_{\text{сц}}$  и  $\mu_{\text{воз}}$  – массовые коэффициенты поглощения энергии для сцинтиллятора и воздуха;  $C$  – ко-

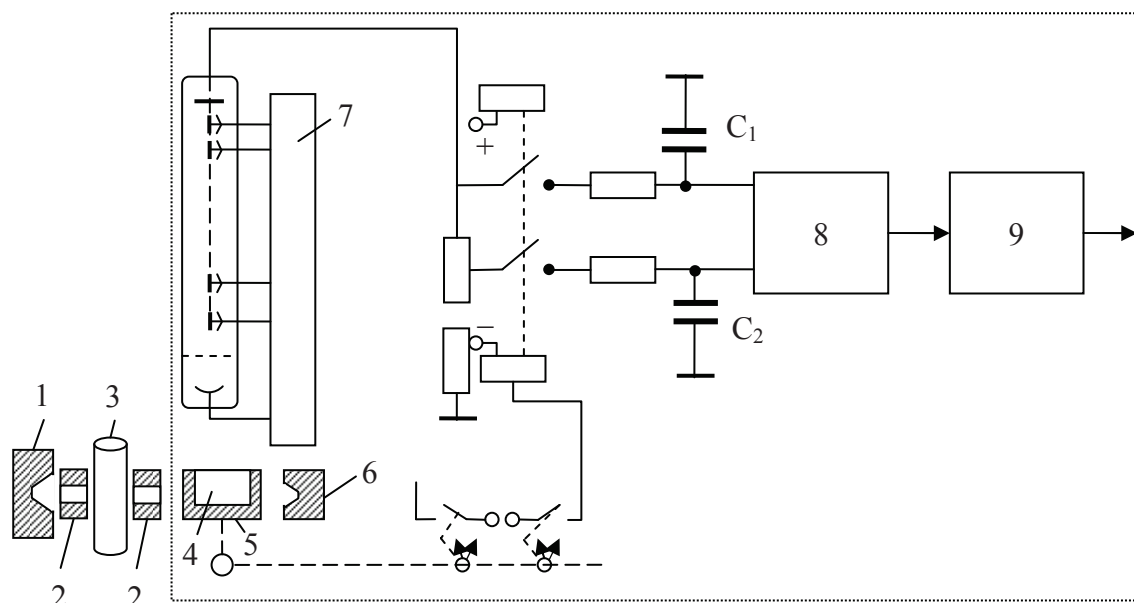


Рис. 9. Функциональная схема радиометрического канала при работе датчика в токовом режиме: 1 – основной источник; 2 – коллиматоры; 3 – измерительный модуль; 4 – датчик; 5 – obturator; 6 – контрольный источник; 7 – фотоэлектронный умножитель; 8 – эмиттерный повторитель; 9 – аналого-цифровой преобразователь

Fig. 9. Functional diagram of the radiometric channel when the sensor is operating in current mode: 1 is the main source; 2 are the collimators; 3 is the measuring module; 4 is the sensor; 5 is the obturator; 6 is the control source; 7 is the photoelectric multiplier; 8 is the emitter follower; 9 is the analog-to-digital converter

эффицент пропорциональности;  $\rho_{\text{сц}}$  – плотность материала сцинтиллятора.

В счетном режиме работы сцинтиллятора с ФЭУ производится подсчет импульсов  $N$  тока за единичный интервал времени.

Чувствительность сцинтилляционного детектора в счетном режиме определяется по формуле

$$\frac{N}{D} = \frac{B(1 - \exp(-\mu_{\text{сц}} \rho_{\text{сц}} d))}{\mu_{\text{воз}}}$$

Выбор режима работы сцинтилляционного детектора определяет структурную схему радиометрического канала.

#### Обсуждение результатов

Функциональная схема радиометрического канала при токовом режиме работы сцинтилляционного детектора изображена на рис. 9.

Для устранения нестабильности характеристик детектора (изменение усиления ФЭУ, температурная зависимость сцинтиллятора и др.) используются основной – 1 и контрольный – 6 источники гамма-излучения. Сцинтиллятор  $\text{NaI (Tl)}$  – 4 помещен в свинцовый полуцилиндр-обтюратор – 5, который попеременно перекрывает поток излучения так, что за время одного полупериода регистрируются фотоны основного источника, прошедшие через контролируемую среду – 3, за время второго полупериода – фотоны контрольного источника. Анодный ток фотоумножителя, возникающий при регистрации основного источника, заряжает

через контактные группы конденсатор  $C_1$ , а при регистрации излучения контрольного источника – конденсатор  $C_2$ .

Время зарядки должно быть меньше половины периода вращения свинцового обтюратора. Настройка прибора осуществляется с помощью движка реохорда. При этом добиваются равенства напряжений на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ , когда измерительный модуль заполнен водой. При появлении пульпы в измерительном модуле произойдет ослабление потока гамма-излучения, что приведет к разбалансу напряжений на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ . С помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) напряжение на конденсаторах преобразуется в цифровую информацию, которая поступает на микропроцессор для последующей обработки в соответствии с разработанным алгоритмом определения плотности твердой фазы пульпы.

Счетный режим работы сцинтилляционного датчика более предпочтителен по сравнению с токовым, так как менее подвержен влиянию шумов на результаты измерений. На рис. 10 приведена структурная схема радиометрического канала при работе датчика (детектора) в счетном режиме. Импульсы, поступающие от датчика, после усиления подаются на интегральный дискриминатор и далее на измеритель скорости счета. В этом блоке частота следования импульсов преобразуется в сигнал постоянного тока, который в дальнейшем с помощью АЦП представляется в виде цифровой информации для обработки микропроцессором.



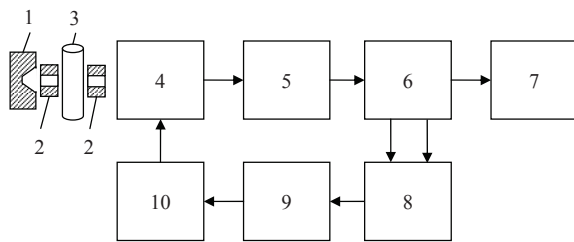


Рис. 10. Структурная схема радиометрического канала при работе датчика в счетном режиме: 1 – источник излучения; 2 – коллиматоры; 3 – измерительный модуль; 4 – датчик; 5 – усилитель импульсов; 6 – интегральный дискриминатор; 7 – измеритель скорости счета; 8 – генератор сигнала ошибки; 9 – усилитель постоянного тока; 10 – источник высоковольтного питания

Fig. 10. Structural diagram of the radiometric channel when the sensor is operating in the counting mode: 1 is the radiation source; 2 are the collimators; 3 is the measuring module; 4 is the sensor; 5 is the pulse amplifier; 6 is the integral discriminator; 7 is the meter of counting speed; 8 is the error signal generator; 9 is the constant current amplifier; 10 is the source of high-voltage power supply

Для устранения нестабильности характеристик детектора необходимо использовать стабилизацию, при которой цепью обратной связи охвачен сам ФЭУ. При подобной стабилизации двухканальный интегральный дискриминатор должен иметь одинаковую ширину каналов. Величина напряжений на выходе генератора сигнала ошибки будет равна нулю, если скорости счета в каналах дискриминатора одинаковы, т. е.  $N_1=N_2$ , где  $N_1$  и  $N_2$  – число импульсов в первом и втором каналах дискриминатора соответственно.

При отклонении скорости счета в каналах знак и величина  $\Delta N=N_1-N_2$  определяют знак и величину напряжения на выходе генератора сигнала ошибки. Это напряжение регулирует величину анодного напряжения ФЭУ, при этом обратная связь охватывает весь измерительный тракт.

В заключение следует отметить, что для повышения точности измерения необходимо осуществлять коррекцию на время нечувствительности детектора, которая на наблюдаемой скорости счета  $N$  оценивается с помощью уравнения

$$N_c = N / (1 - d_a N),$$

где  $N_c$  – конечное корректируемое значение скорости счета, используемое в дальнейшем в алгоритме формирования сигнала  $S$ ;  $d_a$  – время нечувствительности детектора на один импульс счета для фотонов источника.

Время нечувствительности, определенное в работе [37] с точностью (0,1 мкс для фотонов источника  $^{141}\text{Am}$ , составляет величину 6,2 мкс. Наибольшее влияние на точность измерения времени нечувствительности сказывается при большой скорости счета, т. е. когда формируется опорный сигнал по чистой воде.

На рис. 11 приведена схема устройства контроля плотности твердой фазы суспензий, реализующего способ измерений, изложенный выше.

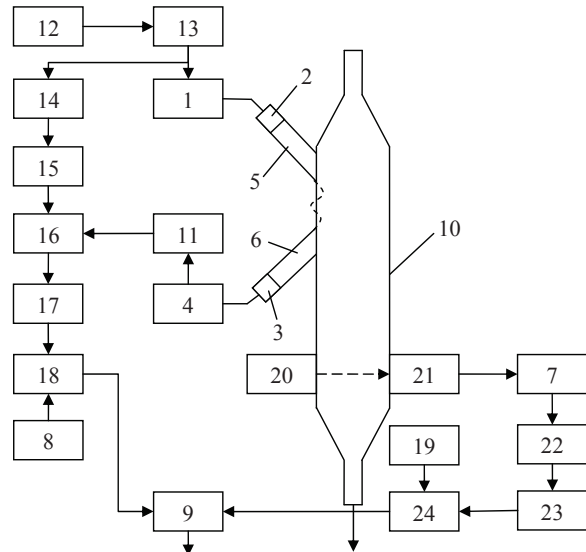


Рис. 11. Схема устройства контроля плотности твердой фазы суспензий: 1 – генератор импульсов; 2 – излучающий преобразователь; 3 – приемный преобразователь; 4, 7 – усилители; 5, 6 – формирующие призмы; 8, 19 – блоки задания; 9 – блок деления; 10 – измерительный сосуд; 11 – амплитудный детектор; 12 – мультивибратор; 13 – одновибратор; 14 – линия задержки; 15 – формирователь импульсов; 16 – блок селекции; 17, 22 – фильтры; 18, 24 – блок вычитания; 20 – источник гамма-излучения; 21 – приемник гамма-излучения; 23 – логарифмический преобразователь

Fig. 11. Scheme of the device for controlling the density of the solid phase of the suspension: 1, 5 are the pulse generators; 2, 6 are the emitting transducers; 3 is the receiving transducer; 4, 7 are the amplifiers; 8, 19 are the task blocks; 9 is the division unit; 10 is the measuring vessel; 11 is the amplitude detector; 12 is the multivibrator; 13 is the single-vibrator; 14 is the delay line; 15 is the pulse driver; 16 is the selection block; 17, 22 are the filters; 18, 24 is the subtraction unit; 20 is the source of gamma radiation; 21 is the gamma-ray receiver; 23 is the logarithmic converter

Волны Лэмба, пройдя фиксированное расстояние по стенке измерительного сосуда – 10, поступают на приемный преобразователь – 3, который осуществляет преобразование упругих ультразвуковых колебаний в электрический сигнал. Величина затухания волн Лэмба определяется только концентрацией твердой фазы контролируемой суспензии, протекающей в измерительном сосуда – 10.

Источник – 20 формирует гамма-излучение, которое проходит через исследуемую среду и принимается приемником – 21. Величина ослабления интенсивности гамма-излучения зависит от концентрации твердой фазы и плотности частиц, ее составляющих.

В блоке деления – 9 вычисляется величина  $S$ , которая пропорциональна плотности частиц твердой фазы исследуемой среды.

Испытания прибора контроля плотности твердой фазы пульпы с использованием радиометрического измерительного канала проводились применительно к сырью Криворожского железорудного бассейна. При этом использовался измерительный



канал на основе поверхностных волн Лэмба ультразвукового гранулометра «Пульсар» [35]. В качестве источника излучения использовался изотоп  $^{241}_{95}\text{Am}$ . Детектор излучения работал в токовом режиме. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе использовались образцы, специально сформированные из измельченного рудного материала с заранее определенными характеристиками. На основании проводимых измерений по ультразвуковому и радиометрическому каналам вычислялся сигнал по формуле (4) и строилась градуировочная кривая. На втором этапе по результатам измерений с помощью градуировочной кривой определялось содержание полезного минерала в разных фракциях материала пробы.

Погрешность измерений в этом варианте конструкции прибора составляла 1–3 %. Отмечено, что погрешность измерений увеличивалась с уменьшением концентрации твердой фазы в зоне контроля, что связано с особенностями измерений по каналу на основе волн Лэмба.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 286 с.
2. Lamb H. On waves in an elastic plate // *Proc. of the Royal Society of London. Series A*. – 1917. – № 93. – P. 114–128.
3. Обогащаемость железных руд / И.П. Богданова, Н.А. Нестерова, В.С. Федорченко, Ю.Л. Грицай. – М.: Недра, 1989. – 158 с.
4. Ржевский В.В., Ямщиков В.С. Ультразвуковой контроль и исследования в горном деле. – М.: Недра, 1968. – 120 с.
5. Noninvasive real-time multipoint temperature control for ultrasound phased array treatments / R. Seip, P. VanBaren, C. Cain, E. Ebbini // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. – 1996. – № 6. – P. 1063–1073.
6. Использование волн Лэмба для сигнализации уровня жидких сред / Н.И. Бражников, Н.С. Шавыкина, А.П. Гордеев, В.С. Скрипалёв // *Приборы и системы управления*. – 1975. – № 9. – С. 31–32.
7. Гуманюк М.Н. Ультразвук в горной автоматике. – К.: Техніка, 1970. – 192 с.
8. Ямщиков В.С., Коробейников Н.С. Применение ультразвука в горной промышленности: обзор. – М.: Недра, 1967. – 52 с.
9. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы. – М.: Энергия, 1975. – 91 с.
10. Development of the method of quasioptimal robust control for periodic operational processes / I. Lutsenko, E. Fomovskaya, S. Koval, O. Serdiuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – V. 4. – № 2 (88). – P. 52–60.
11. Development of the method for determining optimal parameters of the process of displacement of technological objects / I. Lutsenko, V. Tytiuk, I. Oksanych, Zh. Rozhnenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – V. 6. – № 3 (90). – P. 41–48.
12. Development of a method for the accelerated two-stage search for an optimal control trajectory in periodical processes / I. Lutsenko, O. Fomovskaya, I. Konokh, I. Oksanych // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – V. 3. – № 1 (87). – P. 47–55.
13. Jamshidi R., Brenner G. Dissipation of ultrasonic wave propagation in bubbly liquids considering the effect of compressibility to the first order of acoustical Mach number // *Ultrasonics*. – 2013. – V. 53. – Iss. 4. – P. 842–848.
14. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. P. I: Theory, nonlinear attenuation and traveling wave generation // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2012. – V. 19. – Iss. 1. – P. 56–65.
15. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. P. II: Primary Bjerknes force and bubble structures // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2012. – V. 19. – Iss. 1. – P. 66–76.
16. Vanhille C., Campos-Pozuelo C. Nonlinear ultrasonic waves in bubbly liquids with nonhomogeneous bubble distribution: Numerical // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2009. V. 16. – Iss. 5. – P. 669–685.
17. Tejedor Sastre M.T., Vanhille C. A numerical model for the study of the difference frequency generated from nonlinear mixing of standing ultrasonic waves in bubbly liquids // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2017. – V. 34. – P. 881–888.
18. Zhang Y., Du X. Influences of non-uniform pressure field outside bubbles on the propagation of acoustic waves in dilute bubbly liquids // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2015. – V. 26. – P. 119–127.
19. Lamb wave analysis for non-destructive testing of concrete plate structures / N. Ryden, C.B. Park, P. Ulriksen, R.D. Miller // *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2003)*. – San Antonio, Texas, April 6–10, 2003. – P. 782–793.
20. Lee C., Staszewski W.J. Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part I. Wave propagation // *Smart Materials and Structures*. – 2009. – V. 12. № 5. – P. 804–814.
21. Debarnot M., Le Letty R., Lhermet N. Ultrasonic NDT based on Lamb waves: development of a dedicated drive and monitoring electronic // *Proc. of the 3<sup>rd</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring*. – Granada, Spain, 2006. – P. 1207–1213.
22. Subhash N., Krishnan B. Modelling and experiments for the development of a guided wave liquid level sensor // *Proc. of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*. – Thiruvananthapuram, India, 2011. – P. 240–244.
23. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. The gas bubble size distribution control formation in the flotation process // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2014. – № 4. – P. 42–45.
24. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Iron ore flotation process control and optimization using high-energy ultrasound // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2014. – № 2. – P. 36–42.

#### Выводы

1. Выявленные закономерности распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами, в процессе их естественного и специально организованного перемещения позволяют определить плотность частиц твердой фазы, которая при известной их крупности и концентрации в контролируемом объеме характеризует степень раскрытия полезного компонента (минерала).
2. Разработана схема устройства контроля плотности твердой фазы суспензий на основе закономерностей распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами. Погрешность измерений плотности частиц твердой фазы пульпы этим методом составляет 1–3 %.

25. Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 5. – P. 7–11.
26. Synthesis of robust controllers of technological units control systems of ore-dressing factory / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron, S. Hryshchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – V. 1. – № 9 (91). – P. 48–57.
27. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 49–52.
28. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 38–41.
29. Arikian P., Aytemiz O., Zararsiz A. X-ray fluorescence analysis of iron in ore dressing processes // Spectroscopy Letters. – 1998. – V. 31. – P. 275–282.
30. Yamada Y. X-ray fluorescence analysis by fusion bead method for ores and rocks // The Rigaku Journal. – 2010. – V. 26 (2). – P. 15–23.
31. Анализ минералов с помощью рентгенофлуоресцентных спектрометров Axios Minerals (PANalytical) с применением пакета стандартов WROXI. URL: <http://www.nalkho.com/equipment/Axios%20Minerals%20WROXI.pdf> (дата обращения 03.05.2018).
32. Idres A., Bounouala M. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer du gisement de l'ouenza par radiometrie // Journal de Physique IV. – 2005. – V. 124. – P. 177–181.
33. Кармазин В.И., Кармазин В.В. Магнитные методы обогащения. – М.: Недра, 1978. – 384 с.
34. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. – М.: МГТУ, 2005. – 426 с.
35. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Ultrasonic facilities for the ground materials characteristics control // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2. – P. 31–35.
36. Кейз К., Цайфель П. Линейная теория переноса. – М.: Мир, 1972. – 384 с.
37. Фано У., Спенсер Л., Бергер М. Перенос гамма-излучения. – М.: Госатомиздат, 1963. – 284 с.

Поступила 11.05.2018 г.

#### Информация об авторах

**Моркун В.С.**, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Криворожского национального университета.

**Моркун Н.В.**, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета.

**Тронь В.В.**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета.

**Грищенко С.Н.**, кандидат педагогических наук, заведующая отделом научно-технической информации научно-исследовательской части Криворожского национального университета.

**Бровко Д.В.**, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник Академии горных наук Украины.

**Паранюк Д.И.**, инженер департамента по безопасности ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

**Сердюк А.Ю.**, ассистент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета.

UDC 621.926:34.16

## EVALUATION OF PARTICLE DENSITY OF PULP SOLID PHASE USING GAMMA-RAY AND LAMB WAVES MEASURING CHANNELS

**Vladimir S. Morkun<sup>1</sup>,**  
morkunv@gmail.com

**Natalia V. Morkun<sup>1</sup>,**  
nmorkun@gmail.com

**Vitaliy V. Tron<sup>1</sup>,**  
vtron@ukr.net

**Svitlana M. Hryshchenko<sup>1</sup>,**  
s-grischenko@ukr.net

**Dmytry V. Brovko<sup>2</sup>,**  
brovko@i.ua

**Dmitriy I. Paranyuk<sup>3</sup>,**  
paranyuk@i.ua

**Aleksandra Yu. Serdyuk<sup>1</sup>,**  
o.serdiuk@i.ua

<sup>1</sup> Krivoy Rog National University,  
11, Vitaliy Matusevych street, Krivoy Rog, 50027, Ukraine.

<sup>2</sup> Academy of Mining Sciences of Ukraine,  
37, Pushkin street, Krivoy Rog, 50002, Ukraine.

<sup>3</sup> ArcelorMittal Krivoy Rog,  
1, Krivorozhstali street, Krivoy Rog, 50000, Ukraine.

**The relevance** of the research is caused by the need to improve the accuracy of the means for ultrasonic operational monitoring of the characteristics of iron ore pulp solid phase in enrichment process. This area of means for improving will allow increasing the efficiency of controlling the enrichment and the quality of the final products.

**The main aim** of the research is to increase the accuracy when measuring the particles density in pulp solid phase based on the laws of gamma radiation propagation in randomly non-uniform heterogeneous environments, as well as Lamb waves along the surfaces in contact with these fluids, in their natural or specially organized movement.

**Objects:** processes of gamma radiation propagation in randomly inhomogeneous heterogeneous media, as well as Lamb waves on surfaces contacting these media.

**Methods:** systematization and analysis of the methods developed for ultrasonic controlling the characteristics of solid phase of heterogeneous environments, methods of mathematical statistics and probability theory for processing the results of experiments, computer information technologies and software technologies designed to implement the techniques developed.

**Results.** Investigated distribution patterns of gamma radiation in randomly non-uniform heterogeneous environments, as well as Lamb waves along the surfaces in contact with these fluids, in their natural or specially organized movement allow determining particle density of solid phase, which characterizes the degree of disclosure of a useful component (mineral) at known particle size and concentration in the test volume. The authors have developed the scheme for monitoring the suspensions solid phase density based on the obtained regularities. The error in measuring particle density in pulp solid phase by this method is 1–3 %.

### Key words:

Ore enrichment, Lamb waves, gamma radiation, non-destructive testing, pulp characteristics.

### REFERENCES

1. Viktorov I. *Zvukovyye poverkhnostnyye volny v tverdykh telakh* [Sound Surface Waves in Solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 286 p.
2. Lamb H. On waves in an elastic plate. *Proc. of the Royal Society of London. Series A*, 1917, no. 93, pp. 114–128.
3. Bogdanova I.P., Nesterova N.A., Fedorchenko V.S., Gritsay Yu.L. *Obogatimost zheleznykh rud* [Concentration of iron ores]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 158 p.
4. Rzhavskiy V., Yamshchikov V. *Ultrazvukovoy kontrol i issledovaniya v gornom dele* [Ultrasonic inspection and research in mining]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 120 p.
5. Seip R., VanBaren P., Cain C., Ebbini E. Noninvasive real-time multipoint temperature control for ultrasound phased array treatments. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1996, vol. 43, 6, pp. 1063–1073.
6. Brazhnikov N., Shavykina N., Gordeev A., Skripalev V. *Ispolzovanie voln Lemba dlya signalizatsii urovnya zhidkikh sred* [Use of

- Lamb waves to signal the level of liquid media]. *Pribory i sistemy upravleniya*, 1975, vol. 9, pp. 31–32.
7. Gumanyuk M. *Ultrazvuk v gornoy avtomatike* [Ultrasound in mining automation]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1970. 192 p.
  8. Yamschikov V., Korobeynikov N. *Primeneniye ultrazvuka v gornoy promyshlennosti: obzor* [Use of ultrasound in mining industry: a review]. Moscow, Nedra Publ., 1967. 52 p.
  9. Brazhnikov N. *Ultrazvukovye metody* [Ultrasonic methods]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 91 p.
  10. Lutsenko I., Fomovskaya E., Koval S., Serdiuk O. Development of the method of quasioptimal robust control for periodic operational processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 4, no. 2 (88), pp. 52–60.
  11. Lutsenko I., Tytiuk V., Oksanych I., Rozhnenko Zh. Development of the method for determining optimal parameters of the process of displacement of technological objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 6, no. 3 (90), pp. 41–48.
  12. Lutsenko I., Fomovskaya O., Konokh I., Oksanych I. Development of a method for the accelerated two-stage search for an optimal control trajectory in periodical processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 3, no. 1 (87), pp. 47–55.
  13. Jamshidi R., Brenner G. Dissipation of ultrasonic wave propagation in bubbly liquids considering the effect of compressibility to the first order of acoustical Mach number. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, no. 4, pp. 842–848.
  14. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. P. I: Theory, nonlinear attenuation and traveling wave generation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 56–65.
  15. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. Part II: Primary Bjerknes force and bubble structures. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 66–76.
  16. Vanhille C., Campos-Pozuelo C. Nonlinear ultrasonic waves in bubbly liquids with nonhomogeneous bubble distribution: Numerical experiments. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 669–685.
  17. Tejedor Sastre M.T., Vanhille C. A numerical model for the study of the difference frequency generated from nonlinear mixing of standing ultrasonic waves in bubbly liquids. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 34, pp. 881–888.
  18. Zhang Y., Du X. Influences of non-uniform pressure field outside bubbles on the propagation of acoustic waves in dilute bubbly liquids. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, vol. 26, pp. 119–127.
  19. Ryden N., Park C.B., Ulriksen P., Miller R.D. Lamb wave analysis for non-destructive testing of concrete plate structures. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2003)*. San Antonio, Texas, April 6–10, 2003. pp. 782–793.
  20. Lee C., Staszewski W.J. Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: P. I. Wave propagation. *Smart Materials and Structures*, 2009, vol. 12, no. 5, pp. 804–814.
  21. Debarnot M., Le Letty R., Lhermet N. Ultrasonic NDT based on Lamb waves: Development of a dedicated drive and monitoring electronic. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring*. Granada, Spain, 2006. pp. 1207–1213.
  22. Subhash N.N., Krishnan B. Modelling and experiments for the development of a guided wave liquid level sensor. *Proc. of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*. Thiruvananthapuram, India, 2011. pp. 240–244.
  23. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. The gas bubble size distribution control formation in the flotation process. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, vol. 4, pp. 42–45.
  24. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Iron ore flotation process control and optimization using high-energy ultrasound. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, vol. 2, pp. 36–42.
  25. Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 5, pp. 7–11.
  26. Morkun V., Morkun N., Tron V., Hryshchenko S. Synthesis of robust controllers of technological units control systems of ore-dressing factory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 1, no. 9 (91), pp. 48–57.
  27. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 3, pp. 49–52.
  28. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 3, pp. 38–41.
  29. Arian P., Aytemiz O., Zararsiz A. X-ray fluorescence analysis of iron in ore dressing processes. *Spectroscopy Letters*, 1998, vol. 31, pp. 275–282.
  30. Yamada Y. X-ray fluorescence analysis by fusion bead method for ores and rocks. *The Rigaku Journal*, 2010, vol. 26 (2), pp. 15–23.
  31. *Analiz mineralov s pomoshchyu rentgenofluorescentnykh spektrometrov Axios Minerals (PANalytical) s primeneniem paketa standartov WROXI* [Analysis of minerals using X-ray fluorescence spectrometers Axios Minerals (PANalytical) using the WROXI standards package]. Available at: <http://www.nalkho.com/equipment/Axios%20Minerals%20WROXI.pdf> (accessed 3 May 2018).
  32. Idres A., Bounouala M. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer du gisement de l'ouenza par radiometrie [Possibility of a new technology for the treatment of iron ore from the Ouenza deposit by radiometry]. *Journal de Physique IV*, 2005, vol. 124, pp. 177–181. In Fr.
  33. Karmazin V.I., Karmazin V.V. *Magnitnye metody obogashcheniya* [Magnetic methods of enrichment]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 384 p.
  34. Karmazin V.V., Karmazin V.I. *Magnitnyye, elektricheskiye i spetsialnyye metody obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Magnetic, electrical and special methods of mineral processing]. Moscow, MG TU Publ., 2005. 426 p.
  35. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Ultrasonic facilities for the ground materials characteristics control. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, vol. 2, pp. 31–35.
  36. Keyz K., Ts fayfel P. *Lineynaya teoriya perenosa* [Linear transport theory]. Moscow, Mir Publ., 1972. 384 p.
  37. Fano U., Spenser L., Berger M. *Perenos gamma-izlucheniya* [Transfer of gamma radiation]. Moscow, Gosatomizdat Publ., 1963. 284 p.

Received: 11 May 2018.



**Information about the authors**

*Vladimir S. Morkun*, Dr. Sc., professor, Vice rector, Krivoy Rog National University.

*Natalia V. Morkun*, Dr. Sc., associate professor, head of the department, Krivoy Rog National University.

*Vitaliy V. Tron*, Cand. Sc., associate professor, Krivoy Rog National University.

*Svitlana M. Hryshchenko*, Cand. Sc., head of the department, Krivoy Rog National University.

*Dmytry V. Brovko*, Cand. Sc., associate professor, researcher, Academy of Mining Sciences of Ukraine.

*Dmitriy I. Paranyuk*, engineer, ArcelorMittal Krivoy Rog.

*Aleksandra Yu. Serdyuk*, assistant, Krivoy Rog National University.

УДК 546.442:539.163

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ИЗОТОПОВ САМАРИЯ ОТ ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ГИДРООКИСЕЙ МНГОВАЛЕНТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Сальменбаев Саян Елеусизович<sup>1,2</sup>,  
salmenbayev@nnc.kz

Макарычев Сергей Владимирович<sup>2</sup>,  
makarychev1949@mail.ru

Степанова Алиса Александровна<sup>1</sup>,  
alisa2008.84@mail.ru

Нургайсинова Назгуль Кадирбековна<sup>1</sup>,  
nazgul.nurgaysinova14@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный ядерный центр,  
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 26

<sup>2</sup> Алтайский государственный аграрный университет,  
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью создания методической базы по определению содержания <sup>151</sup>Sm на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона. В настоящее время информация об уровнях содержания данного радионуклида в объектах окружающей среды отсутствует, что не позволяет учитывать его влияние на дозовую нагрузку населения ведущего хозяйственную деятельность на территории полигона и потребляющего продукты данной сельскохозяйственной деятельности.

**Цель:** оценить степень очистки изотопов самария от щелочных и щелочноземельных элементов при осаждении гидроксидов многовалентных металлов, в рамках разработки методики радиохимического определения <sup>151</sup>Sm в почвенном покрове на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона.

**Объект:** раствор на основе азотной кислоты концентрацией 3 моль/л, моделирующий состав раствора, получаемого после кислотной обработки почвы. Для приготовления раствора использовались основные макро- и микроэлементы, входящие в состав почвы, а также такие элементы, как: висмут, свинец, таллий, радиоактивные изотопы которых входят в радиоактивные семейства урана и тория.

**Методы:** измерение pH растворов на приборе MAPK-901; измерение концентрации химических элементов с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7700x и атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 Duo.

**Результаты.** Представлены результаты исследований по оценке степени очистки изотопов самария от щелочных и щелочноземельных элементов при осаждении гидроксидов. Предложено наиболее оптимальное значение pH, при котором захват примесей незначителен, а выход изотопов самария максимален. Очистка от щелочных элементов составила в среднем 90 %, от щелочноземельных 80 %.

### Ключевые слова:

Макроэлементы и микроэлементы, самарий-151, осаждение гидроксидов, экспериментальная оценка степени очистки, соосаждение.

### Введение

Атмосферные испытания ядерного оружия, проведенные в период с середины 1940-х до 1980-х гг., различные радиационные аварии привели к обширному загрязнению природной среды различными техногенными радионуклидами [1–11]. На Семипалатинском испытательном ядерном полигоне (СИП) было проведено более 400 ядерных испытаний, включая 116 атмосферных [12, 13], которые привели к радиоактивному загрязнению территории полигона [14–17], прилегающих областей [18], а также территорий далеко за ее пределами [1].

В настоящее время для характеристики и оценки радиоэкологической ситуации, складывающейся на территории бывшего СИП, как правило, определяют содержание таких техногенных ра-

дионуклидов, как: <sup>241</sup>Am, <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu, <sup>3</sup>H, <sup>152,154,155</sup>Eu, <sup>60</sup>Co [12, 19–24]. Однако существуют такие радионуклиды, как: <sup>14</sup>C, <sup>129</sup>I, <sup>99</sup>Tc и <sup>151</sup>Sm, информация об уровнях содержания которых в почве, растительности и водных объектах на территории СИП отсутствует, что не позволяет учитывать их влияние на дозовую нагрузку для населения ведущего хозяйственную деятельность на территории полигона (выпас скота, заготовка сена, добыча полезных ископаемых) и потребляющего продукты животноводства (молочные продукты, мясо т. д.). Период полураспада <sup>151</sup>Sm составляет порядка 90 лет [25–27]. На основании прогнозной оценки на данный момент активность <sup>151</sup>Sm может составлять около 8 % от активности <sup>137</sup>Cs [28]. Наряду с ядерными взрывами изотоп <sup>151</sup>Sm образуется при

работе атомных реакторов [29, 30], что будет иметь актуальность при возможном строительстве и эксплуатации атомных станций в Республике Казахстан. Так, например, содержание  $^{151}\text{Sm}$  в 1 т облученного топлива реактора ВВЭР-1000 составляет около 15 г [31].

$^{151}\text{Sm}$  представляет собой чистый  $\beta$ -излучатель с энергией 76,7 кэВ, определение которого проводится, как правило, методом радиометрии, основанной на жидкостной сцинтилляции [32], для чего необходимо его предварительное концентрирование, с отделением основного балласта макрокомпонентов, а также радиохимическая очистка от всех возможных бета-излучателей. Одним из наиболее простых методов, используемых для концентрирования редкоземельных и трансурановых элементов, а также сброса основной массы матричных элементов, является осаждение гидроксидов.

Цель данной работы: оценка степени очистки изотопов самария от щелочных и щелочноземельных элементов, при осаждении гидроксидов многовалентных металлов.

#### Объекты и методы исследования

Исходя из данных по среднему содержанию элементов в земной коре [33], был приготовлен раствор, моделирующий состав раствора, получаемого после кислотной обработки почвы (табл. 1). Использовались основные макро- и микроэлементы, входящие в состав почвы, а также некоторые из элементов, радиоактивные изотопы которых входят в природные радиоактивные семейства урана и тория (Bi, Pb, Tl). 50 мл модельного раствора соответствовали навеске почвы массой 5 г. Квалификация использованных реактивов была не ниже «хч», кислотность раствора соответствовала раствору азотной кислоты с концентрацией 3 моль/л.

Таблица 1. Состав модельного раствора

Table 1. Composition of the model solution

Элемент Element	Кларк, % Clarke, %	Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	Элемент Element	Кларк, % Clarke, %	Концентрация, мг/л Concentration, mg/L
Литий (Li)	$3,2 \cdot 10^{-3}$	1,4	Цинк (Zn)	$8,3 \cdot 10^{-3}$	9,5
Бериллий (Be)	$3,8 \cdot 10^{-4}$	0,31	Стронций (Sr)	0,034	49
Натрий (Na)	2,5	$1,9 \cdot 10^3$	Иттрий (Y)	0,002	1,6
Магний (Mg)	1,87	$1,4 \cdot 10^3$	Молибден (Mo)	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,4
Алюминий (Al)	8,05	$7,5 \cdot 10^3$	Кадмий (Cd)	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,13
Калий (K)	2,5	$2,2 \cdot 10^3$	Цезий (Cs)	$3,7 \cdot 10^{-4}$	0,25
Кальций (Ca)	3,96	$2,7 \cdot 10^3$	Барий (Ba)	0,065	240
Хром (Cr)	$8,3 \cdot 10^{-3}$	29	Лантан (La)	$2,9 \cdot 10^{-3}$	2,5
Марганец (Mn)	0,1	110	Самарий (Sm)	$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,72
Железо (Fe)	4,65	$4,2 \cdot 10^3$	Таллий (Tl)	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,92
Кобальт (Co)	$1,8 \cdot 10^{-3}$	1,6	Свинец (Pb)	$1,6 \cdot 10^{-3}$	2,1
Никель (Ni)	$5,8 \cdot 10^{-3}$	9,0	Висмут (Bi)	$9,0 \cdot 10^{-7}$	0,016*
Медь (Cu)	$4,7 \cdot 10^{-3}$	8,5			

\*концентрацию элемента увеличили в 20 раз.

\* element concentration was increased 20 times.

#### Результаты и их обсуждение

Предварительно несколько аликвотных частей модельного раствора (по 50 мл каждая) были оттитрованы концентрированным раствором гидроксида аммония с измерением pH раствора после каждого добавления. В результате получили интегральную и дифференциальную зависимости потенциометрического титрования (рис. 1).

Из полученных результатов видно, что имеются два скачка титрования (Б), основной из которых начинается при добавлении 14 мл концентрированного раствора гидроксида аммония, pH раствора при этом находится в пределах 3,6–3,7 единиц (А). Имеющийся перегиб в области скачка титрования модельного раствора объясняется связыванием части гидроксид-ионов ( $\text{OH}^-$ ) с ионами металлов (преимущественно Fe и Al), в результате чего концентрация ионов водорода ( $\text{H}^+$ ) снижается не так резко.

Для дальнейших экспериментов в стеклянные химические стаканы пипеткой Мора отбиралось по 50 мл модельного раствора. Стакан с отобраным образцом помещался на магнитную мешалку для постоянного перемешивания. В каждый отобранный образец из бюретки приливалось 14 мл концентрированного раствора гидроксида аммония, затем pH раствора по каплям подводился к необходимому значению начиная с 4,0 с шагом в 0,5 единиц. Полученные осадки отделялись от раствора центрифугированием, дважды промывались одинаковым количеством горячей дистиллированной воды и растворялись в минимальном количестве азотной кислоты с концентрацией 3 моль/л. Растворенные осадки переносились в мерные колбы объемом 200  $\text{cm}^3$ , объем раствора в колбах доводился до метки раствором азотной кислоты аналогичной концентрации. Промывные растворы и фугаты объединялись и также переносились в мерные колбы объемом 200  $\text{cm}^3$ . Аликвотные части подготовленных растворов передавали для измерений на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) и атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС).

#### Сравнительный анализ зависимостей распределения элементов в осадках при использовании различного времени контакта с маточным раствором

Было проведено три параллельных эксперимента, в ходе которых, после подведения среды растворов к необходимому значению pH, растворы с осадками оставлялись на магнитной мешалке на время: 10, 20 и 40 минут соответственно. По истечении указанного времени фиксировалось значение pH и производилось разделение твердой и жидкой фаз. На рис. 2 представлены графики зависимости содержания редкоземельных (Sm, Ln) и щелочных (Cs, K) элементов в осадках гидроксидов от величины pH и времени нахождения осадка в маточном растворе.

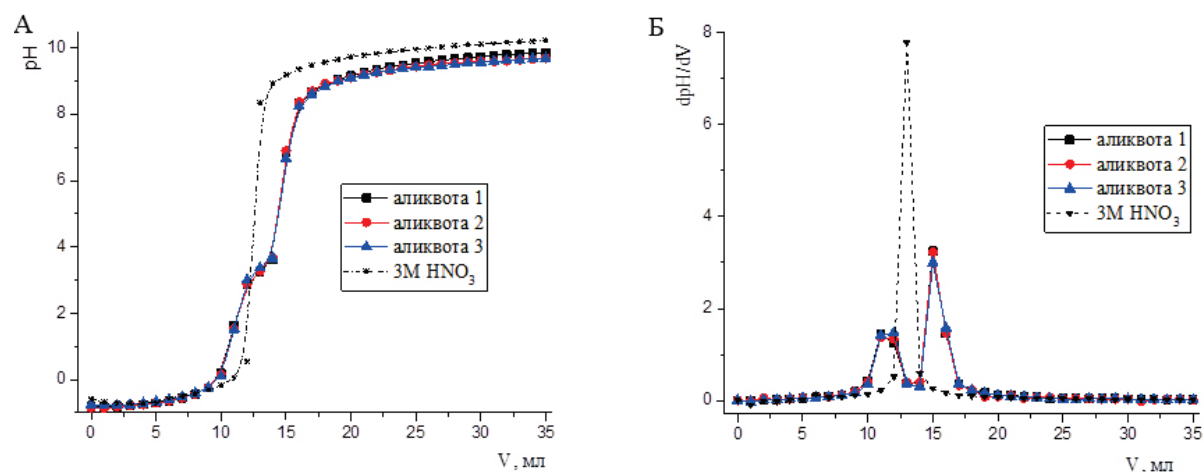


Рис. 1. Интегральная (А) и дифференциальная (Б) кривые потенциометрического титрования модельного раствора концентрированным раствором гидроксида аммония

Fig. 1. Integral (A) and differential (B) curves of potentiometric titration of a model solution with ammonia concentrated solution

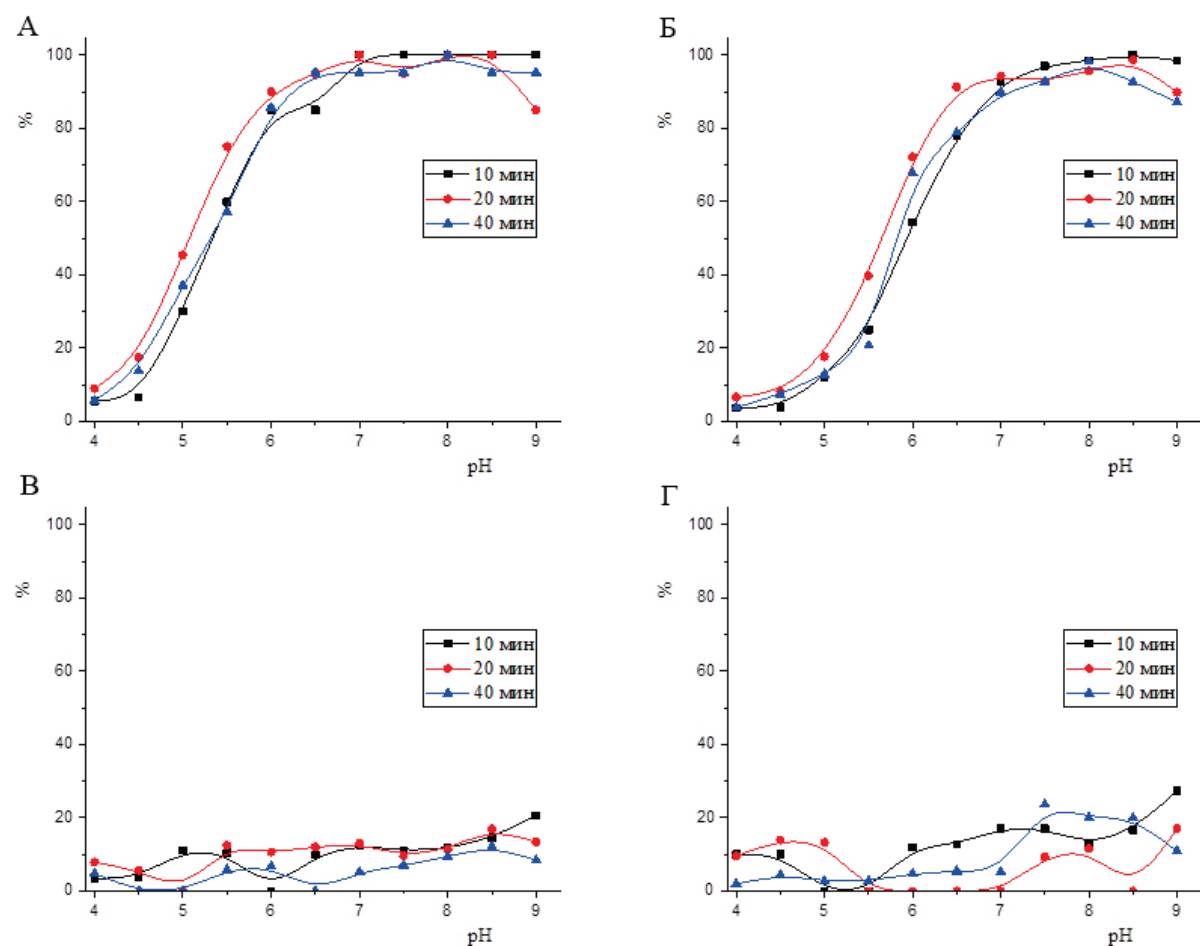


Рис. 2. Содержание самария (А), лантана (Б), цезия (В) и калия (Г) в осадках гидроксидов в зависимости от величины pH и времени выдерживания осадка в маточном растворе

Fig. 2. Content of samarium (A), lanthanum (B), cesium (B) and potassium (D) in the precipitates of hydroxides depending on the pH value and the contact time of the precipitate with the mother liquor



Как следует из полученных графиков, наиболее полному выделению редкоземельных элементов (самария и лантана) соответствует  $\text{pH} \geq 7$ . Для щелочных элементов (Cs, K) в целом с увеличением  $\text{pH}$  наблюдается повышение концентрации в осадках. Так как гидроксиды щелочных металлов хорошо растворимы, то в данном случае мы имеем дело с соосаждением указанных элементов вследствие их механического захвата и адсорбции на поверхности аморфных осадков. По поведению данных щелочных элементов можно предположить поведение их радиоактивных изотопов  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

На рис. 3 представлены графики зависимости содержания щелочноземельных элементов (Mg, Ca, Sr, Ba) в осадках гидроксидов от величины  $\text{pH}$  и времени выдерживания осадка в маточном растворе.

Данные щелочноземельные элементы по растворимости их гидроксидов можно расположить в следующем порядке:  $\text{Mg} > \text{Ca} > \text{Sr} > \text{Ba}$ . Нерастворимые в воде основания образует Mg, малорастворимые – Ca и Sr. Однако осаждение данных элементов происходит при достаточно высоких значениях  $\text{pH}$ . Так, например, началу выделения осадка

гидроксида  $\text{Mg}^{2+}$  соответствует  $\text{pH} \sim 10$  и  $\text{pH} > 12$  для  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$  [34, 35]. Таким образом, можно предположить, что происходит как соосаждение данных элементов с гидроксидами железа и алюминия, так и их выделение в виде малорастворимых карбонатов при взаимодействии с диоксидом углерода ( $\text{CO}_2$ ), присутствующим в растворах гидроксида аммония.

Особый интерес представляет поведение бария (Ba), так как он по химическим свойствам очень близок к радиоактивному радю (Ra). Насколько известно, Ra довольно сильно адсорбируется гидроксидом железа и величина его адсорбции значительно зависит от  $\text{pH}$  раствора и соотношения радия и железа [36].

На рис. 4 представлены графики зависимости содержания Co, Tl и Pb в осадках гидроксидов от величины  $\text{pH}$  и времени нахождения осадка в маточном растворе.

С ростом  $\text{pH}$  раствора концентрация кобальта в осадке резко увеличивается. Одной из причин этого является соосаждение кобальта с осадками гидроксидов, которое может происходить на ранних стадиях осаждения. С увеличением  $\text{pH}$  к этому

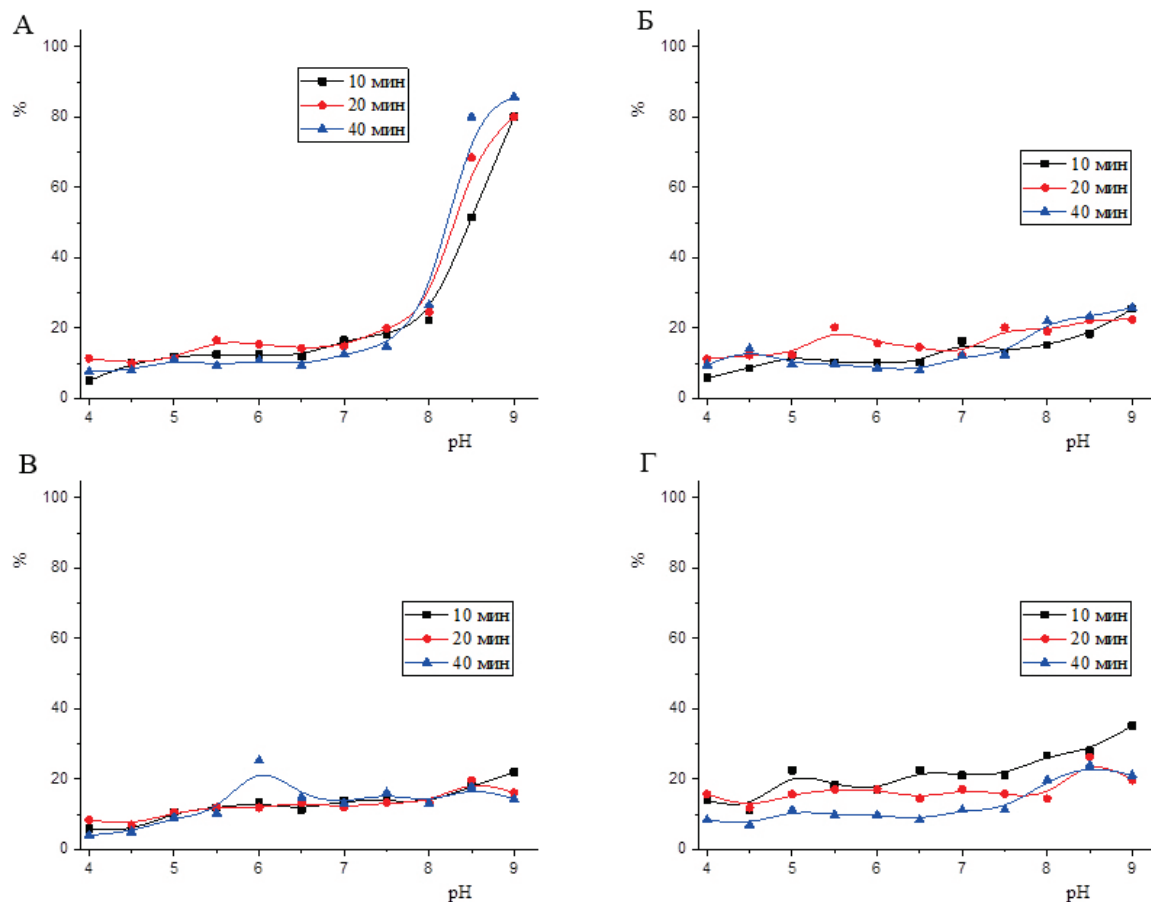


Рис. 3. Содержание магния (А), кальция (Б), стронция (В) и бария (Г) в осадках гидроксидов в зависимости от величины  $\text{pH}$  и времени выдерживания осадка в маточном растворе

Fig. 3. Content of magnesium (A), calcium (B), strontium (B) and barium (Г) in the precipitates of hydroxides depending on the  $\text{pH}$  value and the contact time of the precipitate with the mother liquor

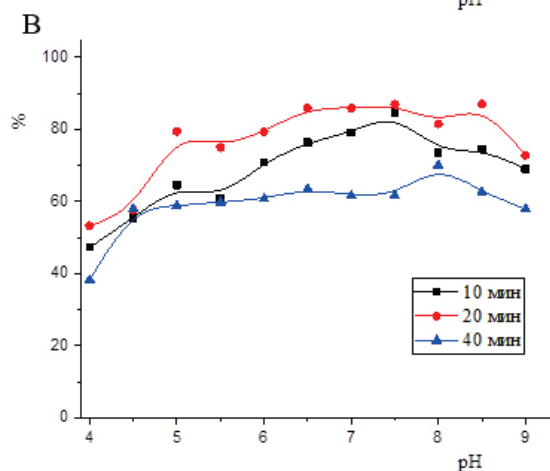
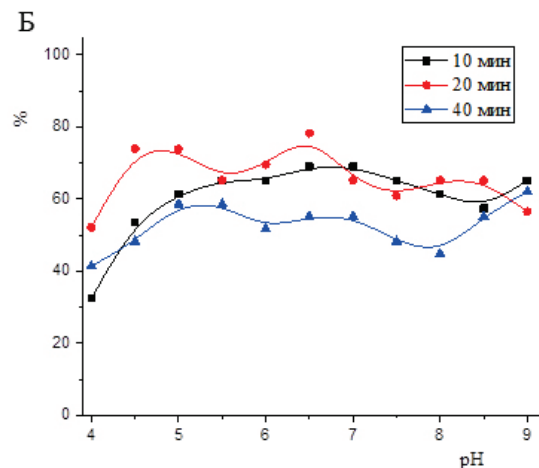
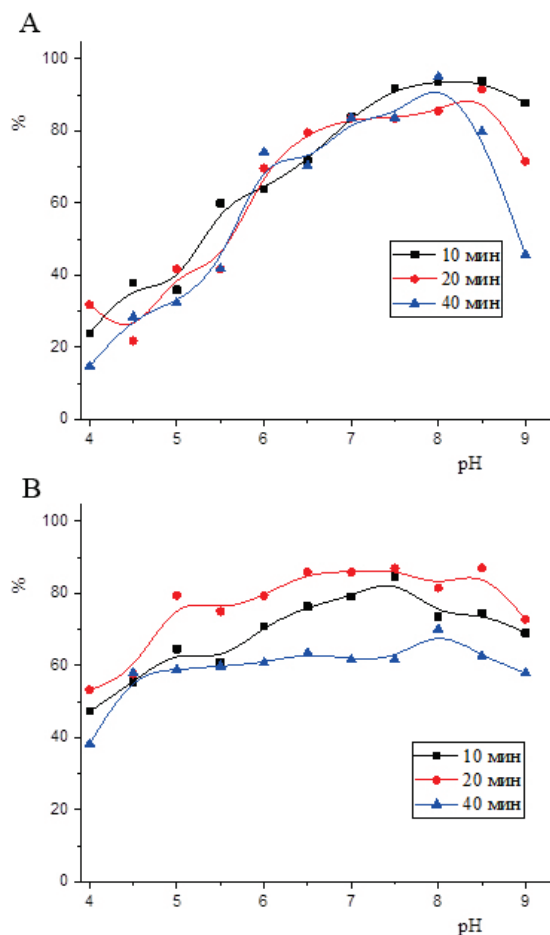


Рис. 4. Содержание кобальта (А), таллия (Б) и свинца (В) в осадках гидроксидов в зависимости от величины рН и времени выдерживания осадка в маточном растворе

Fig. 4. Content of cobalt (A), thallium (B) and lead (B) in precipitates of hydroxides depending on the pH value and the contact time of the precipitate with the mother liquor

процессу добавляется осаждение ионов кобальта в виде осадка  $\text{Co}(\text{OH})_2$ . Имеются сведения о том, что отделение железа и алюминия от кобальта раствором гидроксида аммония не дает удовлетворительных результатов из-за значительного соосаждения кобальта [37]. На распределение кобальта может также оказывать влияние растворение осадка  $\text{Co}(\text{OH})_2$  в избытке гидроксида аммония, с образованием растворимого аммиакатного комплекса состава  $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ .

Таллий вносился в модельный раствор в виде одновалентной соли  $\text{TlNO}_3$ . Так как по химическим свойствам  $\text{TlOH}$  близок к щелочам и обладает хорошей растворимостью в воде, его присутствие в осадке свидетельствует о его значительном соосаждении. Данный факт известен еще из ранних работ по изучению свойств таллия и его соединений [38], где указывается, что при осаждении гидроксидом аммония таллий довольно хорошо адсорбируется на образующихся осадках.

Из свойств свинца известно, что он не только способен соосаждаться с гидроксидами (с  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  может соосаждаться более 90 % свинца), но также может выпадать в осадок в виде гидрата  $\text{PbO} \cdot \text{H}_2\text{O}$  при действии растворов гидроксида аммония и щелочей [39].

#### Сравнение коэффициентов очистки

На основании анализа полученных зависимостей было выбрано наиболее оптимальное, с точки зрения концентрирования изотопов самария и удаления основной массы щелочных и щелочноземельных элементов, значение рН, равное ~7. При меньшем значении рН осаждение изотопов самария не достаточно полное, при большем увеличивается количество соосаждаемых элементов. Для выбранного значения рН были рассчитаны коэффициенты очистки (табл. 2) от макро- и микрокомпонентов (радионуклидов).

Коэффициент очистки рассчитывался как отношение концентрации элемента в исходном растворе ( $C^0$ ) к его концентрации в осадке гидроксидов ( $C'$ ):

$$k = \frac{C^0}{C'}$$

Для Li коэффициент очистки составил диапазон от 2,2 до 3,7 (50–70 %). Возможно, это объясняется тем, что данный элемент по химическим свойствам занимает промежуточное положение между щелочными и щелочноземельными металлами [40]. Для остальных щелочных элементов (Na, K и Cs) коэффициент очистки составил диапазон от 3,4 до 19 (70–90 %).

**Таблица 2.** Коэффициенты очистки изотопов самария при pH=7  
**Table 2.** Coefficients of samarium isotopes purification at pH=7

Элемент Element	Коэффициент очистки изотопов самария Coefficients of samarium isotopes purification		
	10	20	40
	мин/min		
Li	2,2	3,2	3,7
Na	3,4	6,3	17,6
K ( <sup>40</sup> K)	5,9	110,0	19,0
Cs ( <sup>137</sup> Cs)	7,4	6,8	15,6
Be	1,0	1,1	1,0
Mg	6,0	6,7	8,0
Ca	4,2	6,1	7,2
Sr ( <sup>90</sup> Sr)	5,8	7,2	5,3
Ba ( <sup>226,228</sup> Ra)	4,0	4,6	7,5
Tl	1,5	1,5	1,4
Co ( <sup>60</sup> Co)	1,2	1,2	1,2
Mn	2,3	2,3	2,3
Pb ( <sup>210</sup> Pb)	1,3	1,2	1,6
Cr	2,3	1,0	1,0
Ni	1,4	1,3	1,3
Cu	1,8	1,2	1,4

Для щелочноземельных элементов (Ca, Mg, Sr) коэффициент очистки в среднем составил диапазон 4–8 (80–90 %). Для Ba коэффициент очистки составил диапазон от 4 до 7,5 (70–80 %). К элементам, значительно соосаждаемым с гидроксидами Fe и Al, можно отнести Be, Tl, Co, Pb, Cr, Ni, Cu.

В результате сравнения полученных коэффициентов очистки зависимости между временем выдерживания осадка в маточном растворе и количе-

ством соосаждаемых элементов не обнаружено, что может объясняться достаточно сложными процессами, происходящими при образовании аморфных осадков. Однако, насколько известно, процессы адсорбции примесей с течением времени усиливаются [41], что крайне нежелательно.

### Заключение

Проведены исследования по экспериментальной оценке степени очистки изотопов самария от щелочных и щелочноземельных элементов при осаждении гидроксидов. Наиболее оптимальным, с точки зрения концентрирования изотопов самария и удаления основной массы щелочных и щелочноземельных элементов, определено значение pH, равное 7. Степень очистки от щелочных элементов составила 70–90 % (за исключением Li). Для щелочноземельных элементов степень очистки составила 70–90 %. К элементам, значительно соосаждаемым с гидроксидами Fe и Al, можно отнести Be, Tl, Co, Pb, Cr, Ni, Cu, Bi.

Сравнение полученных коэффициентов очистки не показало зависимости между временем выдерживания осадка в маточном растворе и количеством соосаждаемых элементов.

В дальнейшем планируется варьирование условий осаждения в соответствии с имеющимися в литературе рекомендациями по осаждению аморфных осадков: температурный режим, добавление коагуляторов и т. д.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Long-range tropospheric transport of uranium and plutonium weapons fallout from Semipalatinsk nuclear test site to Norway / C.C. Wendel, L.K. Fifield, D.H. Oughton, O.C. Lind, L. Skipperud, J. Bartnicki, S.G. Tims, S. Høibråten, B. Salbu // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2013. – V. 59. – P. 90–102.
- <sup>238</sup>U and <sup>239,240</sup>Pu ratios from soils around an Australian nuclear weapons test site / S.G. Tims, M.B. Froehlich, L.K. Fifield, A. Wallner, M.De. Cesare // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – V. 151. – P. 563–567.
- Анализ современного состояния наземных экосистем на территории восточно-уральского радиоактивного следа / В.Н. Позолотина, И.В. Молчанова, Е.Н. Караваева, Л.Н. Михайловская, Е.В. Антонова, Э.М. Каримуллина // *Вопросы радиационной безопасности. ФГУП «Производственное объединение «Маяк»*. – 2007. – № 5. – С. 32–43.
- Main results of the 2012 joint Norwegian-Russian expedition to the dumping sites of the nuclear submarine K-27 and solid radioactive waste in Steppovogo Fjord, Novaya Zemlya / J.P. Gwynn, A. Nikitin, V. Shershakov, H.E. Heldal, B. Lind et al. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – V. 151. – P. 417–426.
- Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil / S. Forkapic, J. Vasin, I. Bikit, D. Mrdjia, A. Bikit, S. Milic et al. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – V. 166. – P. 104–111.
- Long-term variations of radionuclides in the Bratislava air / I. Šykora, K. Holý, M. Ješkovský, M. Müllerová, M. Bulko, P. Povinec // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – V. 166. – P. 27–35.
- Gamma emitters in atmospheric precipitation in Krakow (Southern Poland) during the years 2005–2015 / J. Mielicki, E. Nalichowska, E. Tomankiewicz, K. Brudecki, P. Janowski, R. Kierepko // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – V. 166. – P. 10–16.
- Radioactive contamination of the soil and plant cover at certain locations of Primorsky Krai, Sakhalin Island and Kamchatka Peninsula: Assessment of the Fukushima fallout / L.N. Mikhailovskaya, I.V. Molchanova, V.N. Pozolotina, Yu.N. Zhuravlev, Ya.O. Timofeeva, M.L. Burdakovsky // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – V. 172. – P. 1–9.
- Radiocesium fallout in the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011 / V. Ramzaev, A. Barkovsky, Yu. Goncharova, A. Gromov, M. Kaduka, I. Romanovich // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2013. – V. 118. – P. 128–142.
- Weak size dependence of resuspended radiocesium adsorbed on soil particles collected after the Fukushima nuclear accident / N. Kaneyasu, H. Ohashi, F. Suzuki, T. Okuda, F. Ikemori, N. Akata, T. Kogure // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – V. 172. – P. 122–129.
- Grabovskiy V.A., Dzendzelyuk O.S., Kushnir O.S. Temporal and seasonal variations of radiocesium content in some plants from the western part of Ukrainian Polesye // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2013. – V. 117. – P. 2–8.
- Tritium as an indicator of venues for nuclear tests / O.N. Lyakhova, S.N. Lukashenko, S.I. Mulgin, S.V. Zhdanov // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2013. – V. 124. – P. 13–21.
- Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н. Исследование вариативности коэффициентов накопления искусственных радионуклидов растениями в местах проведения наземных ядерных испытаний // *Радиобиология: вызовы XXI века: Материалы международной научной конференции, посвященной 30-летию института радиобиологии*. – Гомель: Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, 2017. – С. 106–108.
- Исследование содержания трития в объектах окружающей среды на территории испытательной площадки «Дегелен» /

- О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, М.А. Умаров, А.О. Айдарханов // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – Вып. 4. – С. 80–86.
15. Mechanisms for surface contamination of soils and bottom sediments in the Shagan River zone within former Semipalatinsk Nuclear Test Site / A.O. Aidarkhanov, S.N. Lukashenko, O.N. Lyakhova, S.B. Subbotin, Yu.Yu. Yakovenko, S.V. Genova, A.K. Aidarkhanova // Journal of Environmental Radioactivity. – 2013. – V. 124. – P. 163–170.
16. К вопросу о путях миграции трития за пределы бывшей испытательной площадки «Дегелен» / О.Н. Ляхова, Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.О. Айдарханов, Е.В. Спирин // Радиация и риск. – 2014. – Т. 23. – № 1. – С. 97–103.
17. Паницкий А.В., Лукашенко С.Н., Кадырова Н.Ж. Радионуклиды в организме диких животных семипалатинского испытательного полигона // Ядерная и радиационная физика: Материалы 10-й международной конференции. – Курчатов: НЯЦ РК, 2015. – С. 137–138.
18. Радиоэкологическое состояние территорий, прилегающих к семипалатинскому испытательному полигону / А.О. Айдарханов, С.Н. Лукашенко, М.А. Умаров, Н.В. Ларионова // Ядерная и радиационная физика: Материалы 10-й международной конференции. – Курчатов: РГП НЯЦ РК, 2015. – С. 122–123.
19. Экспериментальное исследование особенностей перехода искусственных радионуклидов в органы и ткани овец в условиях СИП / Ж.А. Байгазинов, А.В. Паницкий, С.М. Лукашенко, С.А. Келлер, С.С. Каратаев, О.Р. Иванова // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана: монография. Вып. 2: Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009. – Павлодар: Дом печати, 2010. – С. 355–386.
20. Исследование распределения искусственных радионуклидов по гранулометрическим фракциям почв на условно «фоновых» территориях Семипалатинского испытательного полигона / А.М. Кабыдракова, А.Е. Кундузбаева, С.Н. Лукашенко, Н.В. Ларионова, Г.Н. Байсеркенова, А.Т. Меньдубаев // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. – 2016. – № 8. – С. 5–16.
21. Радиоэкологическое состояние «юго-восточной» (район с. Саржал) части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук, С.Н. Лукашенко, В.В. Каширский и др. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 26–31.
22. Kozhakhonov T.E., Lukashenko S.N., Larionova N.V. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – V. 137. – P. 217–226.
23. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Kadyrova N.Zh.  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  IN lizards of Semipalatinsk test site // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 166. – P. 91–96.
24. Studying of tritium content in snowpack of Degelen mountain range / D.V. Turchenko, S.N. Lukashenko, A.O. Aidarkhanov, O.N. Lyakhova // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – V. 132. – P. 115–120.
25. Long-lived intermediate level waste from Swedish nuclear power plants. Stockholm / M. Elfving, L. Evins, M. Gontier, P. Grahm, P. Mårtensson, S. Tunbrant // Technical Report. – 2014. – 140 p.
26. Results of the EURAMET. RI (II)- S7.Sm-151 Supplementary Comparison (EURAMET Project 1292) / B. Marie-Martine et al. // Metrologia. – 2015. – V. 52. – P. 2–18.
27. Altizoglou T., Rožkov A. Standardisation of the  $^{129}\text{I}$ ,  $^{151}\text{Sm}$  and  $^{166\text{m}}\text{Ho}$  activity concentration using the CIEMAT/NIST efficiency tracing method // Journal of Applied Radiation and Isotopes. – 2016. – V. 109. – P. 281–285.
28. Радиоэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2010. – Вып. 1. – 234 с.
29. Андрушкин И.А., Юдин Ю.А. Обзор проблем обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом. URL: [http://www.ranipool.ru/images/data/gallery/1\\_7365\\_spentfuel.pdf](http://www.ranipool.ru/images/data/gallery/1_7365_spentfuel.pdf) (дата обращения 18.04.2018).
30. Henner P., Hurtevent P., Thiry Y. Soil-to-plant transfer factors of radioactive Ca, Sm and Pd isotopes: critical assessment of the use of analogies to derive best-estimates from existing non-specific data // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – V. 136. – P. 152–161.
31. Информационный бюллетень Государственного научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны». № 7–8 (13–14). URL: [http://sosny.bas-net.by/wp-content/uploads/2012/09/bul\\_2010\\_7\\_8.pdf](http://sosny.bas-net.by/wp-content/uploads/2012/09/bul_2010_7_8.pdf) (дата обращения 22.02.2018).
32. Separation and purification and beta liquid scintillation analysis of  $^{151}\text{Sm}$  in Savannah River Site and Hanford Site DOE high level waste / R.A. Dewberry, W.T. Boyce, N.E. Bibler, A.E. Ekechukwu, D.M. Ferrara // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2002. – V. 252. – № 3. – P. 503–513.
33. Справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Кокин, А.Е. Мирошников, В.Г. Прохоров. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
34. Справочник химика / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин и др. Т. 4. – Л.: Изд-во «Химия» 1967. – 920 с.
35. Тихонов В.Н. Аналитическая химия магния. – М.: Изд-во «Наука», 1973. – 256 с.
36. Вдовенко В.М., Дубасов Ю.В. Аналитическая химия радия. – М.: Изд-во «Наука», 1973. – 192 с.
37. Пятницкий И.В. Аналитическая химия кобальта. – М.: Изд-во «Наука», 1965. – 261 с.
38. Коренман И.М. Аналитическая химия таллия. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. – 170 с.
39. Полянский Н.Г. Аналитическая химия элементов. Свинец. – М.: Наука, 1986. – 357 с.
40. Полуэктов Н.С., Мешкова С.Б., Полуэктова Е.Н. Аналитическая химия лития. – М.: Изд-во «Наука», 1975. – 204 с.
41. Пискарева С.К., Барашков К.М., Ольшанова К.М. Аналитическая химия. – М.: Высшая школа, 1994. – 384 с.

Поступила 11.05.2018 г.

#### Информация об авторах

**Сальменбаев С.Е.**, начальник группы исследований высокоактивных образцов Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра; аспирант кафедры мелиорации земель и экологии Алтайского государственного аграрного университета.

**Макарычев С.В.**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Алтайского государственного аграрного университета.

**Степанова А.А.**, инженер группы исследований высокоактивных образцов Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра.

**Нургайсинова Н.К.**, техник группы исследований высокоактивных образцов Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра.



UDC 546.442:539.163

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE DEGREE OF SAMARIUM ISOTOPES PURIFICATION FROM ALKALINE AND ALKALINE-EARTH ELEMENTS BY PRECIPITATION OF HYDROXIDES OF POLYVALENT METALS

Sayan E. Salmenbaev<sup>1,2</sup>,  
salmenbayev@nnc.kz

Sergey V. Makarychev<sup>2</sup>,  
makarychev1949@mail.ru

Alisa A. Stepanova<sup>1</sup>,  
alisa2008.84@mail.ru

Nazgul K. Nurgaysinova<sup>1</sup>,  
nazgul.nurgaysinova14@mail.ru

<sup>1</sup> National Nuclear Center of Kazakhstan,  
2, Krasnoarmeyskaya street, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

<sup>2</sup> Altai State Agrarian University,  
98, Krasnoarmeyskiy avenue, Barnaul, 656049, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop a methodological base for determining <sup>151</sup>Sm content in the territory of the former Semipalatinsk test site. At present, there is no information on the levels of content of this radionuclide in the environment. This does not allow estimating the internal exposure doses for population.

**The aim** of the research is to evaluate the degree of purification of samarium isotopes from alkaline and alkaline-earth elements by precipitation of polyvalent metals' hydroxides as part of the development of a method for determining <sup>151</sup>Sm in the soil cover in the territory of former Semipalatinsk test site.

**Object** of the research is a model solution based on nitric acid and containing the basic elements of the soil matrix and stable isotopes of some natural radionuclides (bismuth, lead and thallium).

**Methods.** pH of solutions was determined using MARK-901; concentrations of chemical elements were determined using the Agilent 7700x quadrupole mass spectrometer and the iCAP 6300 Duo atomic emission spectrometer.

**Results.** The authors have proposed the optimal solution pH value for removing the most part of the alkaline and alkaline-earth elements with a sufficiently high yield of samarium. Purification from alkaline elements was on the average of 90 %, from alkaline-earth – 80 %.

### Key words:

Macroelements and microelements, samarium-151, precipitation of hydroxides, experimental evaluation of purification degree, coprecipitation.

### REFERENCES

1. Wendel C.C., Fifield L.K., Oughton D.H., Lind O.C., Skipperud L., Bartnicki J., Tims S.G., Høibråten S., Salbu B. Long-range tropospheric transport of uranium and plutonium weapons fallout from Semipalatinsk nuclear test site to Norway. *Journal of Environment International*, 2013, vol. 59, pp. 90–102.
2. Tims S.G., Froehlich M.B., Fifield L.K., Wallner A., Cesare M.De. <sup>236</sup>U and <sup>239,240</sup>Pu ratios from soils around an Australian nuclear weapons test site. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 151, pp. 563–567.
3. Pozolotina V.N., Molchanova I.V., Karavaeva E.N., Mikhaylovskaya L.N., Antonova E.V., Karimullina E.M. Up-to-date studies of the terrestrial ecosystems on the territory of the East-Urals radioactive trace. *Issues of radiation safety*, 2007, no. 8, pp. 32–43. In Rus.
4. Gwynn J.P., Nikitin A., Shershakov V., Heldal H.E., Lind B. Main results of the 2012 joint Norwegian-Russian expedition to the dumping sites of the nuclear submarine K-27 and solid radioactive waste in Stepovogo Fjord, Novaya Zemlya. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 151, pp. 417–426.
5. Forkapic S., Vasin J., Bikit I., Mrdjia D., Bikit A., Milic S. Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 104–111.
6. Sýkora I., Holý K., Jeřek M., Müllerová M., Bulko M., Povinec P. Long-term variations of radionuclides in the Bratislava air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 27–35.
7. Mietelski J., Nalichowska E., Tomankiewicz E., Brudecki K., Janowski P., Kierepko R. Gamma emitters in atmospheric precipitation in Krakow (Southern Poland) during the years 2005–2015. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 10–16.
8. Mikhailovskaya L.N., Molchanova I.V., Pozolotina V.N., Zhuravlev Yu.N., Timofeeva Ya.O., Burdukovsky M.L. Radioactive contamination of the soil and plant cover at certain locations of Primorsky Krai, Sakhalin Island and Kamchatka Peninsula: Assessment of the Fukushima fallout. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 172, pp. 1–9.
9. Ramzaev V., Barkovsky A., Goncharova Yu., Gromov A., Kaduka M., Romanovich I. Radiocesium fallout in the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, vol. 118, pp. 128–142.
10. Kaneyasu N., Ohashi H., Suzuki F., Okuda T., Ikemori F., Akata N., Kogure T. Weak size dependence of resuspended radiocesium adsorbed on soil particles collected after the Fukushima nuc-

- lear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 172, pp. 122–129.
11. Grabovskiy V.A., Dzdzelyuk O.S., Kushnir O.S. Temporal and seasonal variations of radioaesium content in some plants from the western part of Ukrainian Polesye. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, vol. 117, pp. 2–8.
  12. Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Mulgin S.I., Zhdanov S.V. Tritium as an indicator of venues for nuclear tests. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, vol. 124, pp. 13–21.
  13. Larionova N.V., Lukashenko S.N. Issledovanie variativnosti koefitsientov nakopleniya iskusstvennykh radionuklidov rasteniyami v mestakh provedeniya nazemnykh yadernykh ispytany [Investigation of variability of accumulation coefficients of artificial radionuclides by plants in nuclear test sites]. *Radiobiologiya: vyzovy XXI veka: Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 30-letiyu instituta radiobiologii* [Radiobiology: Challenges of the 21st Century. Proc. of the international scientific conference dedicated to the 30<sup>th</sup> anniversary of the Institute of Radiobiology]. Gomel, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2017. pp. 106–108.
  14. Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Umarov M.A., Ajdarhanov A.O. Investigation of the tritium content in environmental objects at the Degelen test site area. *Bulletin of the NNC RK*, 2007, vol. 4, pp. 80–86. In Rus.
  15. Aidarkhanov A.O., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Subbotin S.B., Yakovenko Yu.Yu., Genova S.V., Aidarkhanova A.K. Mechanisms for surface contamination of soils and bottom sediments in the Shagan River zone within former Semipalatinsk Nuclear Test Site. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, vol. 124, pp. 163–170.
  16. Lyakhova O.N., Larionova N.V., Lukashenko S.N., Aydarkhanov A.O., Spirin E.V. On the tritium migration pathways outside the former «Degelen» site. *Radiation and Risk*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 97–103. In Rus.
  17. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Kadyrova N.Zh. Radionuklidy v organizme dikikh zhivotnykh semipalatinskogo ispytatelnogo poligona [Radionuclides in the wild animals body of the Semipalatinsk test site]. *Yadernaya i radiatsionnaya fizika: Materialy 10-y mezhdunarodnoy konferentsii* [Nuclear and Radiation Physics: Proc. of the 10<sup>th</sup> International Conference]. Kurchatov, NNC Publ., 2015. pp. 137–138.
  18. Aydarkhanov A.O., Lukashenko S.N., Umarov M.A., Larionova N.V. Radioekologicheskoe sostoyanie territoriy, prilgayushchikh k semipalatinskomu ispytatelnomu poligonu [Radioecological condition of the territories adjacent to the Semipalatinsk test site]. *Yadernaya i radiatsionnaya fizika: Materialy 10-y mezhdunarodnoy konferentsii* [Nuclear and Radiation Physics: Proc. of the 10<sup>th</sup> International Conference]. Kurchatov, NNC Publ., 2015. pp. 122–123.
  19. Baygazinov Zh.A., Panitskiy A.V., Lukashenko S.M., Keller S.A., Karataev S.S., Ivanova O.R. Experimentalnoe issledovanie osobennostey perekhoda iskusstvennykh radionuklidov v organy i tkani ovets v usloviyakh SIP [Experimental study of peculiarities of transition of artificial radionuclides to the organs and tissues of sheep in the conditions of the STS]. *Aktualnye voprosy radioekologii Kazakhstana: monografiya* [Topical issues of radioecology of Kazakhstan]. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2010. No. 2, pp. 355–386.
  20. Kabdyrakova A.M., Kunduzbaeva A.E., Lukashenko S.N., Larionova N.V., Bayserkenova T.N., Mendubaev A.T. Investigation of artificial radionuclides in particle-size fraction of soils at the conditionally «background contaminated» areas of Semipalatinsk test site. *Modern science: actual problems of theory and practice*, 2016, no 8, pp. 5–16. In Rus.
  21. Strilchuk Yu.G., Lukashenko S.N., Kashirskiy V.V. Radioekologicheskoe sostoyanie «yugo-vostochnoy» (rayon s. Sarzhai) chasti territorii SIP [Radioecological state of the «southeast» (Sarzhai village) part of the Semipalatinsk test site]. *Aktualnye voprosy radioekologii Kazakhstana* [Topical issues of radioecology of Kazakhstan]. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2013. Vol. 1, Iss. 4, pp. 26–31.
  22. Kozhakhanov T.E., Lukashenko S.N., Larionova N.V. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 137, pp. 217–226.
  23. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Kadyrova N.Zh. <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr IN lizards of Semipalatinsk test site. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166, pp. 91–96.
  24. Turchenko D.V., Lukashenko S.N., Aidarkhanov A.O., Lyakhova O.N. Studying of tritium content in snowpack of Degelen mountain range. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 132, pp. 115–120.
  25. Elfving M., Evins L., Gontier M., Graham P., Mårtensson P., Tunbrant S. Long-lived intermediate level waste from Swedish nuclear power plants. Stockholm. *Technical Report*, 2014. 140 p.
  26. Marie-Martine B. Results of the EURAMET. RI(II)-S7.Sm-151Supplementary Comparison (EURAMET Project 1292). *Metrologi*, 2015, vol. 52, pp. 2–18.
  27. Altizizoglou T., Rožkov A. Standardisation of the <sup>129</sup>I, <sup>151</sup>Sm and <sup>166m</sup>Ho activity concentration using the CIEMAT/NIST efficiency tracing method. *Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 2016, vol. 109, pp. 281–285.
  28. Radioekologicheskoe sostoyanie «severnoy» chasti territorii Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona [Radioecological state of the «northern» part of the Semipalatinsk test site]. *Aktualnye voprosy radioekologii Kazakhstana* [Topical issues of radioecology of Kazakhstan]. Ed. by S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2010. Iss. 1, 234 p.
  29. Andryushkin I.A., Yudin Yu.A. *Obzor problem obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami i otrabotavshim yadernym toplivom* [Review of problems with radioactive waste management and spent nuclear fuel]. Available at: [http://www.ranipool.ru/images/data/gallery/1\\_7365\\_spentfuel.pdf](http://www.ranipool.ru/images/data/gallery/1_7365_spentfuel.pdf) (accessed 18 April 2018).
  30. Henner P., Hurtevent P., Thiry Y. Soil-to-plant transfer factors of radioactive Ca, Sm and Pd isotopes: critical assessment of the use of analogies to derive best-estimates from existing non-specific data. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 136, pp. 152–161.
  31. *Informatsionny byulleten Gosudarstvennogo nauchnogo uchrezhdeniya «Obedinenny institute energeticheskikh i yadernykh issledovaniy – Sosny»* [Information Bulletin of the State Scientific Institution «Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny»]. No. 7–8 (13–14). Available at: [http://sosny.basnet.by/wp-content/uploads/2012/09/bul\\_2010\\_7\\_8.pdf](http://sosny.basnet.by/wp-content/uploads/2012/09/bul_2010_7_8.pdf) (accessed 22 February 2018).
  32. Dewberry R.A., Boyce W.T., Bibler N.E., Ekechukwu A.E., Ferrara D.M. Separation and purification and beta liquid scintillation analysis of <sup>151</sup>Sm in Savannah River Site and Hanford Site DOE high level waste. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2002, vol. 252, no. 3, pp. 503–513.
  33. Vojtkovich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. *Spravochnik po geokhimii* [Handbook of Geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 480 p.
  34. Nikolskiy B.P., Grigorov O.N., Pozin M.E. *Spravochnik khimika* [Chemical Handbook]. Leningrad, Khimiya Publ., 1967. Vol. 4, 920 p.
  35. Tikhonov V.N. *Analiticheskaya khimiya magniya* [Analytical Chemistry of Magnesium]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 256 p.
  36. Vdovenko V.M., Dubasov Yu.V. *Analiticheskaya khimiya radiya* [Analytical chemistry of radium]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 192 p.
  37. Pyatnitskiy I.V. *Analiticheskaya khimiya kobalta* [Analytical chemistry of cobalt]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 261 p.

38. Korenman I.M. *Analiticheskaya khimiya talliya* [Analytical chemistry of thallium]. Moscow, AN SSSR Press, 1960. 170 p.
39. Polyanskiy N.G. *Analiticheskaya khimiya elementov. Svinets* [Analytical chemistry of elements. Lead]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 357 p.
40. Poluektov N.S., Meshkova S.B., Poluektova E.N. *Analiticheskaya khimiya litiya* [Analytical chemistry of lithium]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 204 p.
41. Piskareva S.K., Barashkov K.M., Olshanova K.M. *Analiticheskaya khimiya* [Analytical chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1994. 384 p.

*Received: 11 May 2018.*

#### Information about the authors

**Sayan E. Salmenbaev**, team lead for High Active Sample Research, National Nuclear Center of Kazakhstan; post-graduate of the Altai State Agrarian University.

**Sergey V. Makarychev**, Dr. Sc., professor, Altai State Agrarian University.

**Alisa A. Stepanova**, engineer of the High Active Sample Research Team, National Nuclear Center of Kazakhstan.

**Nazgul K. Nurgaysinova**, technician of the High Active Sample Research Team, National Nuclear Center of Kazakhstan.

УДК 551.577.13:546.21(470.311)

## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ПРЕДГОРЬЯХ АЛТАЯ: ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Малыгина Наталья Сергеевна<sup>1,2</sup>,  
natmgn@gmail.com

Эйрих Алла Николаевна<sup>1</sup>,  
allnik608@gmail.com

Курепина Надежда Юрьевна<sup>1</sup>,  
nyukurepina@mail.ru

Папина Татьяна Савельевна<sup>1</sup>,  
tanya.papina@mail.ru

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН,  
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

<sup>2</sup> Алтайский государственный университет,  
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

**Актуальность.** В последние годы соотношения стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках, полученных на станциях сети Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP), активно используются в качестве надежных маркеров современных, а также прогнозируемых климатических и гидрологических изменений. Однако для обширной территории России наборы таких данных существенно ограничены не только в пространстве, но и по времени. Одним из наиболее перспективных районов исследования в данном направлении является предгорье Алтая – территория, на которой отмечаются значительные климатические и гидрологические изменения в последние десятилетия.

**Цель:** оценить в предгорьях Алтая изменение изотопного состава атмосферных осадков, отобранных в исследуемый период в соответствии с рекомендациями GNIP, и сравнить их с данными интерполяции на основе ранее полученных результатов по сети GNIP для сопредельных территорий.

**Методика.** Отбор проб атмосферных осадков осуществлялся в соответствии с критериями GNIP. Синоптический анализ проводился с учетом данных метеонаблюдений ближайшей метеостанции Росгидромета. Изотопный анализ атмосферных осадков был выполнен методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе PICARRO L2130-i. Полученные результаты сравнивали с интерполированными данными GNIP для предгорной зоны Алтая, рассчитанными с помощью ISOtopic GRidded Rainfall Data Software (ISOGRIDS) и Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction (IsoMAP).

**Результаты.** Анализ изотопного состава атмосферных осадков, отобранных в 2016 г. в предгорьях Алтая в соответствии с рекомендациями GNIP, показал их существенное варьирование. Сравнение изотопного состава атмосферных осадков, одновременно отбиравшихся на изучаемой территории по двум схемам (индивидуальный отбор и ежемесячный), показало высокую степень согласованности, что позволяет при ограниченных условиях применять только их ежемесячный (не событийный) отбор. Сравнение средневзвешенных месячных значений изотопного состава отобранных атмосферных осадков и рассчитанных в IsoMAP и ISOGRIDS показало максимальные отличия в феврале и сентябре. Выявленные отличия связаны с особенностями синоптических условий 2016 г., а именно с устойчивыми положительными температурами в феврале, что нетипично для исследуемой территории, и небольшой повторяемостью осадков в сентябре.

### Ключевые слова:

Атмосферные осадки, изотопный состав, данные наблюдений, данные интерполяции, предгорья Алтая.

### Введение

В последние десятилетия в качестве надежных маркеров гидрологических и климатических изменений эффективно используют стабильные изотопы кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta^2\text{H}$ ) [1, 2]. Активное изучение изотопного состава, в частности в атмосферных осадках, началось в середине прошлого века, что послужило толчком к организации Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) под патронажем Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной метеорологической организации (ВМО) [3]. Результаты ежемесячных наблюдений по унифицированной методике на станциях GNIP, а также дополнительные исследования в других регионах позволили установить, что соотношения стабильных

изотопов в атмосферных осадках в различной степени могут отражать: характер взаимодействия между источником водяного пара и местом выпадений атмосферных осадков; температуру конденсации водяного пара; абсолютную высоту и географическую широту места их выпадения, а также ряд других параметров [4, 5]. Соотношения стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках описывают эмпирической зависимостью, получившей название – глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ,  $\delta\text{D}=8\times\delta^{18}\text{O}+10$ ) [4, 6]. По отклонению изотопных отношений  $\delta^{18}\text{O}\dots\delta\text{D}$  от ГЛМВ возможно оценить процессы изотопного фракционирования, которые приводят к тому, что изменения в системе  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  конкретного региона характеризуются локальной линией метеорных



вод (ЛЛМВ). Кроме того, предложенный В. Дансгором на основе ГЛМВ-зависимости расчетный показатель – дейтериевый эксцесс ( $d\text{-excess} = \delta D - 8 \times \delta^{18}O$ ), успешно применяют для оценки источников поступления атмосферных осадков (водяного пара) [7, 8].

В последние годы наблюдается рост числа работ по изучению пространственных и временных изменений соотношений изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках как в глобальном масштабе, так и в конкретных регионах, имеющих «густую» сеть станций GNIP. Работы такого плана в настоящее время активно проводятся в США [9], Новой Зеландии [10], Швейцарии [11, 12], Китае [13, 14].

На обширной территории Российской Федерации (бывшего СССР) в разное время одновременно функционировало не более 35 станций GNIP, проводивших отбор проб атмосферных осадков хотя бы в течение года и более, из них в азиатской части страны только на 19 станциях велись редкие наблюдения. Наиболее длительный период наблюдений и отбора проб атмосферных осадков по методике GNIP в азиатской части России осуществлялся в г. Якутске (с 1969 по 2000 гг. отобрано и проанализировано 54 пробы), г. Петропавловск-Камчатский (с 1969 по 1990 гг. – 42 пробы), г. Иркутске (с 1969 по 1990 гг. – 14 проб) и в г. Новосибирске (с 1969 по 1990 гг. лишь 12 проб) (рис. 1) [1]. Определение изотопного состава в сезонных атмосферных осадках и ледниковых кернах в нивально-гляциальных областях России проводили во время работы российско-швейцарской [15] и российско-японско-американской [16] экспедиций на Алтае, а также российской экспедиции на Кавказе [17]. К сожалению, и на равнинной территории России выполнено небольшое количество работ по изучению изотопного состава атмосферных осадков [18–25].

Проведенные исследования изотопного состава атмосферных осадков на территории России в своем большинстве не соответствуют критериям международной сети GNIP, хотя именно данные изотопного состава атмосферных осадков необходимы для «изотопного» гидрологического и климатического моделирования и могут быть использованы при планировании, проектировании, эксплуатации и устойчивом управлении водными ресурсами, а также для расчетов региональных климатических прогнозов [26]. Эти исследования особенно важны для горных и предгорных территорий, характеризующихся значительными колебаниями гидрологических и климатических условий, что становится еще более актуальным в условиях интенсивно изменяющегося климата. Перспективным районом исследования в этом отношении является предгорье Алтая, так как расположено на границе равнин юга Западной Сибири и основных орографических барьеров Алтая. Территорию предгорий отличает от соседних равнин большее количество осадков и более мощный снежный покров, что обуславливает уникальные условия увлажнения. В гидрологическом режиме значительную роль играют талые воды, так как за холодный период выпадает до 40 % от годового количества осадков, а вклад талого стока составляет 60–80 % от годового стока [27]. Стоит отметить, что год от года климатическая и гидрологическая обстановка в предгорьях Алтая резко меняются, что может приводить к катастрофическим последствиям, как, например, наводнения в 2014 и 2018 гг. на Алтае [28, 29]. Таким образом, целью настоящей работы стала оценка изменений изотопного состава атмосферных осадков, отобранных в предгорьях Алтая в соответствии с рекомендациями GNIP, а также их сравнение с интерполированными данными, полученными ранее по сети GNIP для сопредельных территорий.



Рис. 1. Станции GNIP в азиатской части России, имеющие наиболее длительные ряды наблюдений, и врезка с местоположением точек отбора проб в предгорьях Алтая: опорная точка МС Зональное – большая красная звездочка, и точки, расположенные на удалении не более 100 км от МС Зональное – маленькие красные звездочки

Fig. 1. GNIP stations in the Asian part of Russia with long observational data and an insert with the location of sampling points in Altai foothills: the main point of the WS Zonalnoe is a large red star and points located at a distance of not more than 100 km from the WS Zonalnoe – small red asterisks

## Материалы и методы

Отбор проб атмосферных осадков, выпадающих на территории предгорий Алтая, проводился по двум схемам. Первая схема отбора применялась для получения достоверной сопутствующей метеорологической информации и в соответствии с критериями GNIP представляла ежемесячный (непрерывный в течение 30–31 дней) отбор проб атмосферных осадков на точках, расположенных на некотором удалении (не более 100 км) от метеорологической станции (МС – Зональное, Алтайский край). Вторая схема включала отбор проб в опорной точке (52,3° с.ш., 85,1° в.д., высота над ур. моря 270 м) в каждом случае выпадения осадков непосредственно после их прекращения с фиксацией наблюдаемых синоптических условий (рис. 1). В соответствии с рекомендациями GNIP отбор проб по двум схемам на Алтае реализовывался впервые. Непосредственно после отбора проводили измерение объема проб, затем их упаковывали в герметичные пробирки, которые хранили в холодильнике до начала изотопного анализа. В холодный период года, когда выпадали твердые атмосферные осадки (снег), пробы снега таяли в закрытых пластиковых пакетах, а затем помещали в герметичные пробирки, которые также хранили в холодильнике до начала анализа. Всего за период с 01 января по 01 ноября 2016 г. было отобрано 111 индивидуальных проб и 42 месячные пробы атмосферных осадков.

Синоптические условия в период выпадения атмосферных осадков оценивали на основе метеонаблюдений в непосредственной близости от точки отбора осадков. Кроме того, использовали данные Росгидромета и Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA), представленные на сайтах [30, 31].

Изотопный анализ атмосферных осадков был выполнен в Химико-аналитическом центре Института водных и экологических проблем СО РАН методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе PICARRO L2130-i, оснащённом системой WS-CRDS (Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy). Точность измерения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  ( $1\sigma$ ,  $n=5$ ) составляла  $\pm 0,1$  и  $\pm 0,4$  ‰ соответственно, а в качестве стандартов использовали пробы воды, откалиброванные относительно Международного стандарта V-SMOW-2 (МАГАТЭ).

В настоящей работе использовали программное обеспечение ISOtopic GRidded Rainfall Data Software (ISOGRIDS), которое было разработано для расчетов и визуализации данных изотопного состава атмосферных осадков по градусной сетке в глобальном масштабе на основе значений GNIP [32]. Разработка ISOGRIDS осуществлялась в рамках проекта «Geostatistical Methods of Spatial Isotope Variability to Map the Sources of Water for Hydrology and Climate Studies», который реализовывался под эгидой МАГАТЭ. Дополнительно привлекали данные, полученные из онлайн-калькулятора, размещенного на портале Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction (IsoMAP) [33].

## Результаты и обсуждение

Анализ синоптических условий 2016 г., а именно данных восьмисрочных наблюдений температуры воздуха на МС Зональное, показал (рис. 2), что в феврале наблюдалось два продолжительных периода повышения температуры. Резкий кратковременный рост температур также был зафиксирован в апреле, а максимум – в июне. Стоит отметить, что в октябре 2016 г. преобладали отрицательные температуры воздуха, что нетипично для этого периода. Максимальные атмосферные осадки в предгорной зоне Алтая отмечались в июле месяце (более 25 мм) – два события, а более 10 мм за срок наблюдения выпадали в апреле, мае, июне, июле и октябре (рис. 2).

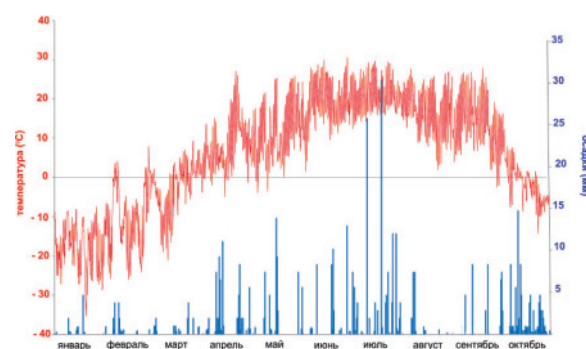


Рис. 2. Температура воздуха и атмосферные осадки (по данным метеостанции Зональное) в январе–октябре 2016 г.

Fig. 2. Air temperature and precipitation (data from weather station Zonalnoe) in January–October 2016

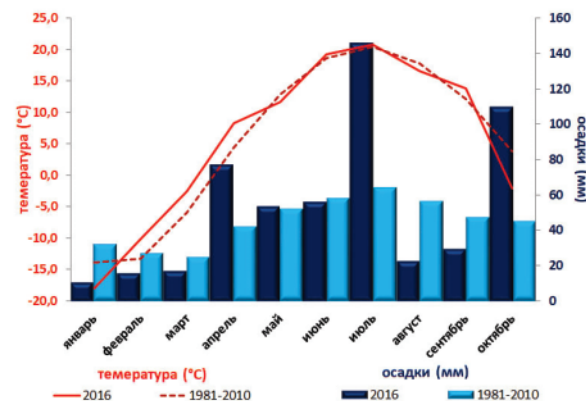


Рис. 3. Температура воздуха и атмосферные осадки в предгорной зоне Алтая (метеостанция Зональное) за период с января по октябрь 2016 г. и средние значения для 1981–2010 гг.

Fig. 3. Air temperature and precipitation in Altai foothills (weather station Zonalnoe) for the period from January to October 2016 and average data for 1981–2010

При сравнении месячных значений температуры и осадков 2016 г. со средними значениями за 1981–2010 гг. в предгорьях Алтая (по данным метеостанции Зональное) наблюдаются резкие различия. Так, средняя температура в феврале, марте и апреле 2016 г. была выше (на 3 °С) среднемесячных значений 1981–2010 гг., а в январе и октябре – ниже на 4 и 6 °С соответственно. При этом осадков в 2016 г. выпадало больше в апреле (на 35 мм), июле

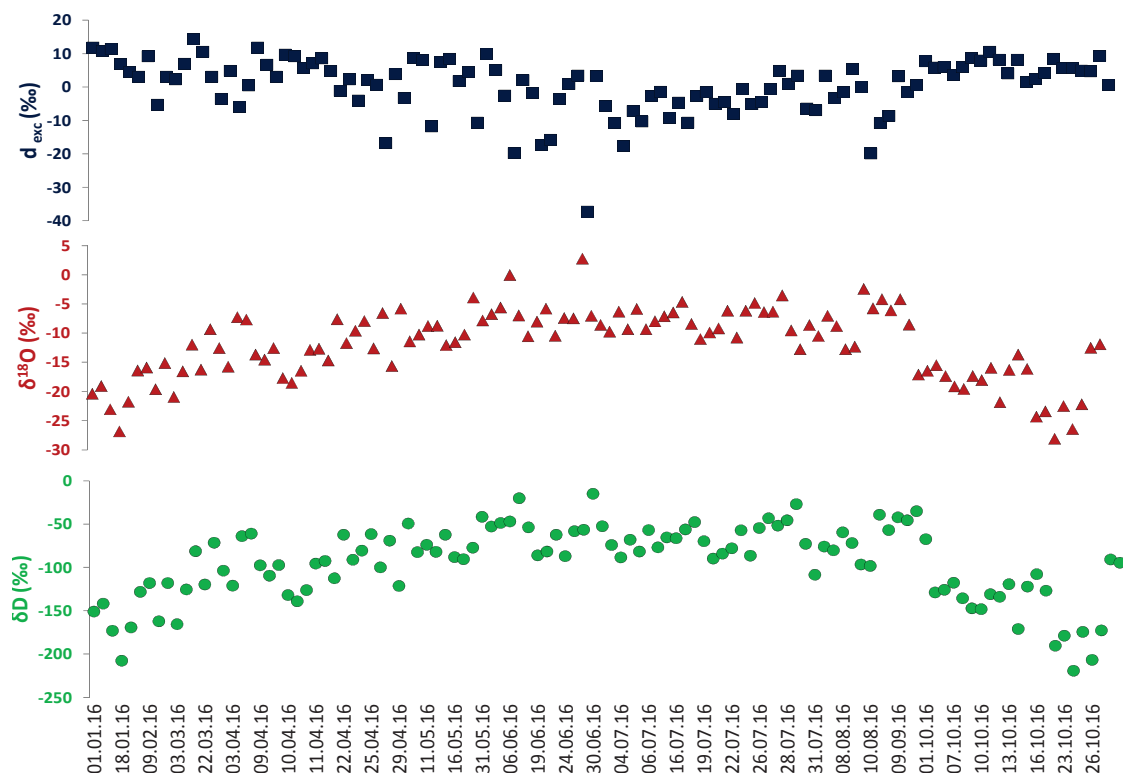


Рис. 4. Изотопный состав атмосферных осадков, выпадавших в январе–октябре 2016 г. в предгорьях Алтая (индивидуальный отбор)

Fig. 4. Isotopic composition of precipitation in January–October 2016 in Altai foothills (daily sampling)

(на 82 мм) и октябре (на 64 мм), чем в среднем в эти же месяцы 1981–2010 гг. Однако в январе, августе и сентябре осадков было существенно меньше – на 21, 33 и 31 мм соответственно (рис. 3).

Анализ погодных условий в предгорьях Алтая показал, что в феврале 2016 г. отмечалось два случая с устойчивым переход температуры воздуха через 0 °С, а максимальные температуры были зафиксированы в июне. Максимальное количество осадков было зарегистрировано в июле 2016 г.

Изотопный анализ 111 индивидуальных проб атмосферных осадков, отобранных в предгорьях Алтая за период с января по октябрь 2016 г., показал существенное варьирование как для  $\delta^{18}\text{O}$  –28,12...+2,78 ‰, так и для  $\delta\text{D}$  –219,3...–15,0 ‰, и как следствие – для  $d_{\text{exc}}$  –37,3...+14,3 ‰ (рис. 4). Полученные результаты позволяют предположить значительное влияние криогенного (в холодный сезон) и испарительного (чаще в теплый сезон) фракционирования на формирование изотопного

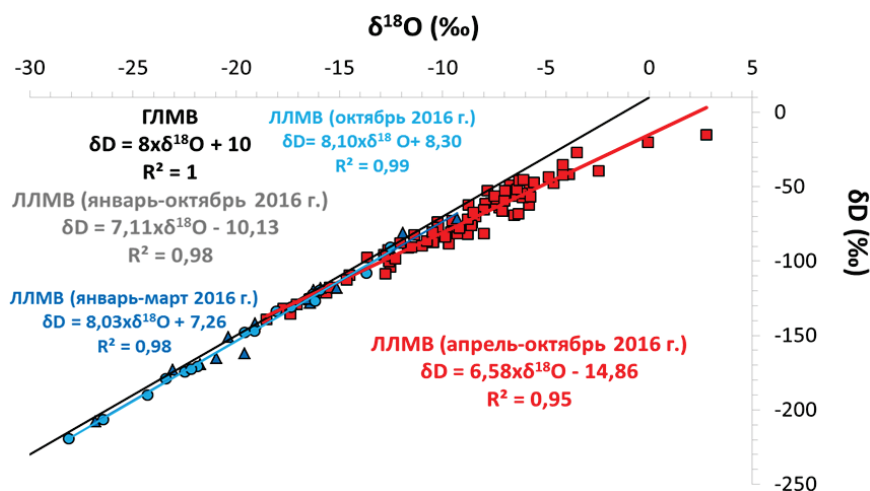


Рис. 5. ЛЛМВ атмосферных осадков, отобранных в предгорьях Алтая (январь–октябрь 2016 г.)

Fig. 5. Local Meteoric Water Line of precipitation collected in Altai foothills (January–October 2016)



состава атмосферных осадков, а также смену основных регионов-источников поступления атмосферной влаги, выпадавшей в виде осадков.

Рассчитанная ЛЛМВ атмосферных осадков описывается уравнением:  $\delta D = 7,11 \times \delta^{18}O - 10,1$  (рис. 5). Полученные значения угла наклона меньше значения для ГЛМВ, равного 8, что позволяет говорить о существенном влиянии испарительного фракционирования на изотопный состав атмосферных осадков. Однако при анализе рассчитанных ЛЛМВ по сезонам: холодный (атмосферные осадки выпадали в виде снега с января по март – I период и с 16 по 30 октября – II период) и теплый (осадки – в виде дождя с апреля по 15 октября), наблюдаются существенные

различия. Так, для холодных периодов ЛЛМВ описывается уравнениями:  $\delta D = 8,03 \times \delta^{18}O + 7,26$  (I период) и  $\delta D = 8,10 \times \delta^{18}O + 8,30$  (II период), при этом углы наклона несколько превышают значения для ГЛМВ, что указывает на преимущественное влияние криогенного фракционирования на формирование изотопного состава атмосферных осадков. ЛЛМВ для теплого периода описывается уравнением:  $\delta D = 6,58 \times \delta^{18}O - 14,8$ , а значение углового коэффициента  $< 8$  свидетельствует о влиянии испарительного фракционирования и/или смене источников атмосферной влаги, выпадающей в виде осадков.

Таким образом, результаты изотопного анализа проб атмосферных осадков, отобранных в предго-

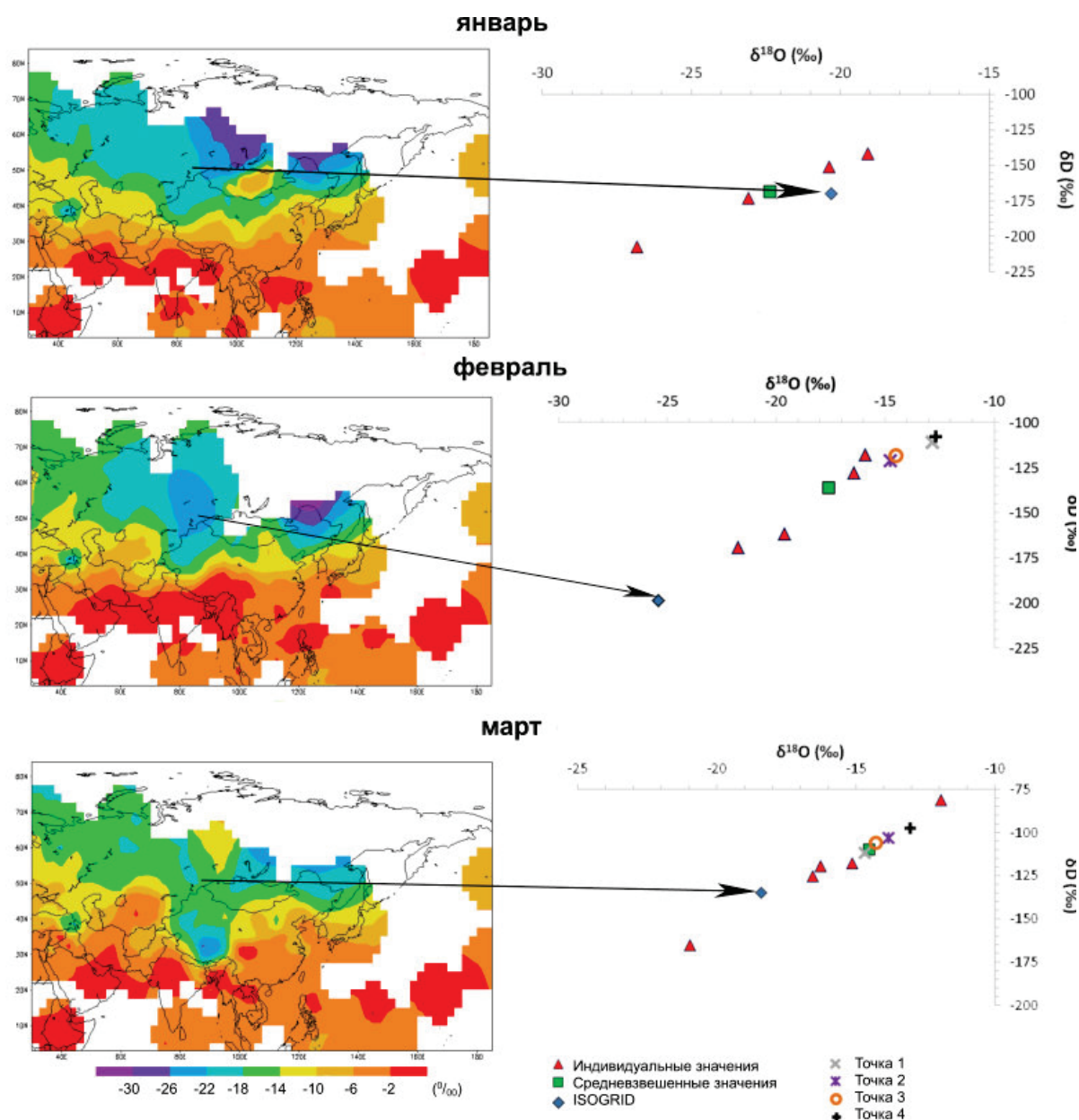


Рис. 6. Картошемы ISOGRIDS и значения изотопного состава атмосферных осадков, отобранных в предгорьях Алтая (первый холодный период)

Fig. 6. ISOGRIDS and isotopic composition of precipitation collected in Altai foothills (the first cold period)



рях Алтая в январе–октябре 2016 г., показали значительное варьирование изотопного состава, а именно: для  $\delta^{18}\text{O}$   $\sim 31$  ‰, для  $\delta\text{D}$   $\sim 204$  ‰ и для  $d_{\text{exc}}$   $\sim 52$  ‰. В совокупности с данными рассчитанных ЛЛМВ есть все основания с большой степенью вероятности говорить о влиянии криогенного фракционирования на формирование изотопного состава атмосферных осадков в холодные периоды 2016 г. и испарительного фракционирования и/или смену источников поступления атмосферных осадков в теплый период 2016 г.

Рассчитанные для каждого месяца средневзвешенные значения изотопного состава атмосферных осадков и данные, полученные для проб осадков, непрерывно отбиравшихся в течение месяца, были сопоставлены с данными ISOGRIDS. Важно отметить, что наиболее близко расположенная станция GNIP (г. Новосибирск) находится на удалении порядка 200 км по прямой от района исследования. Отбор проб атмосферных осадков на этой станции для последующего изотопного анализа осуществлялся в 1969–1990 гг., при этом было

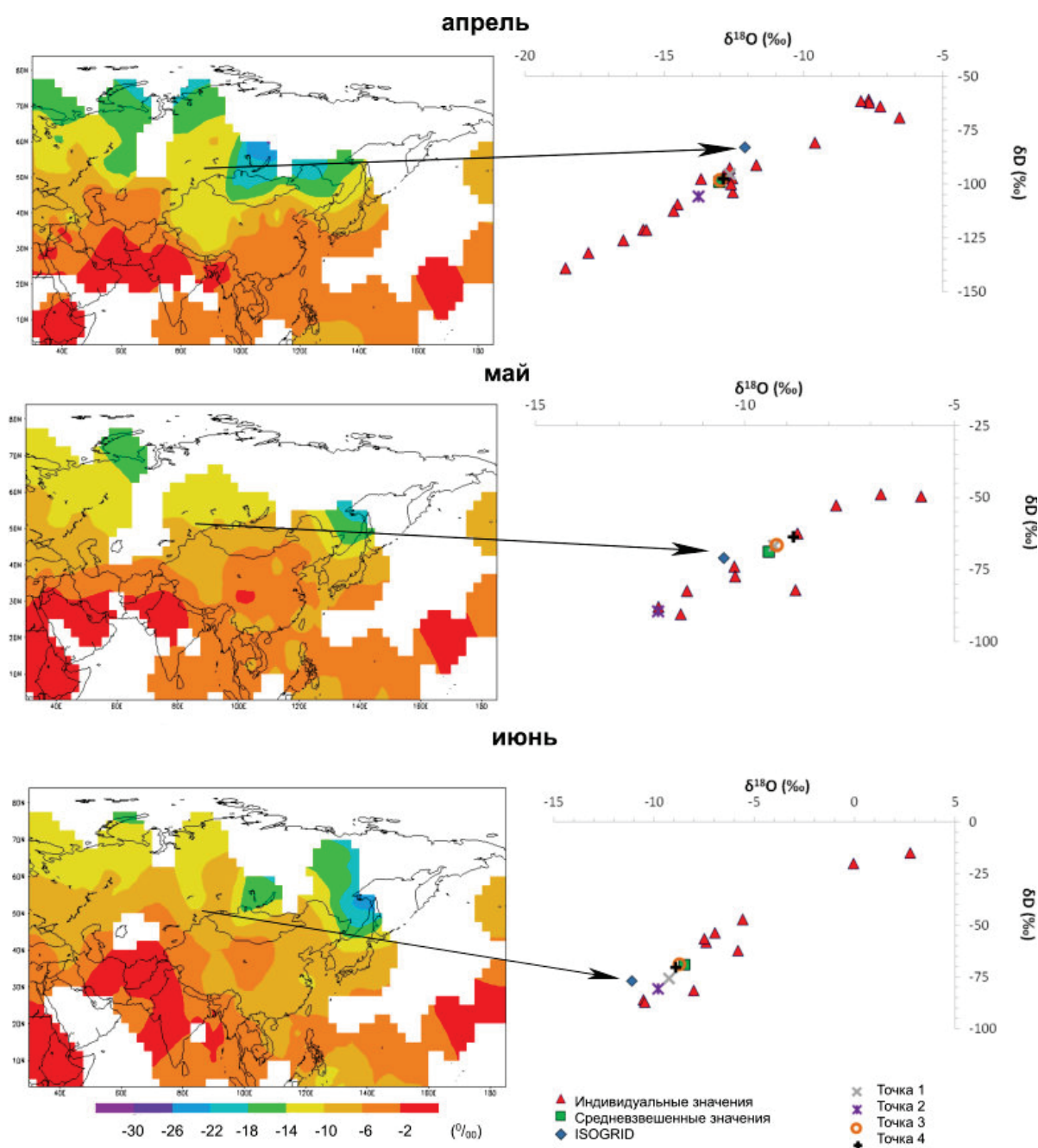


Рис. 7. Картограммы ISOGRIDS и значения изотопного состава атмосферных осадков, отобранных в предгорьях Алтая

Fig. 7. ISOGRIDS and isotopic composition of precipitation collected in Altai foothills (the warm period)

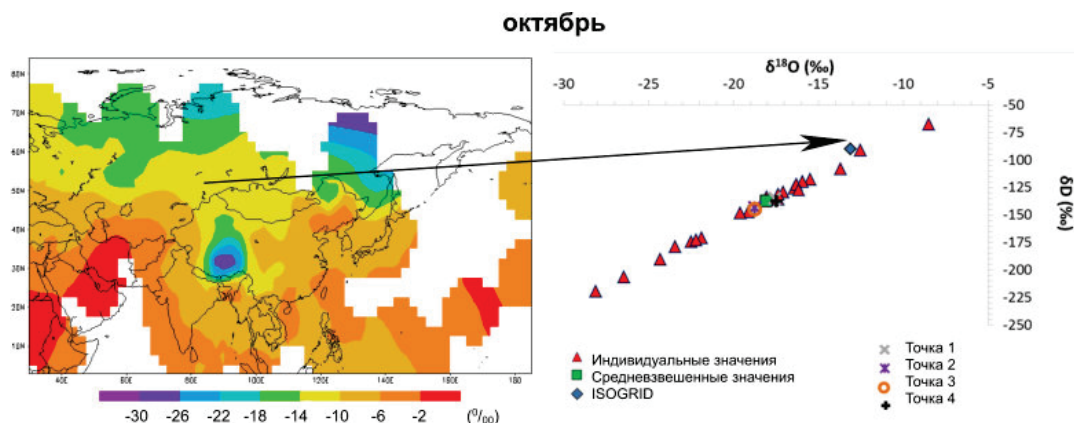


Рис. 8. Картосхема ISOGRIDS и значения изотопного состава атмосферных осадков, отображенных в предгорьях Алтая

Fig. 8. ISOGRIDS and isotopic composition of precipitation collected in Altai foothills (the second cold period)

проанализировано всего 12 проб. Именно эти немногочисленные данные использовались при интерполяции ISOGRIDS.

В первом холодном периоде (январь–март) значения изотопного состава атмосферных осадков в целом были близки, однако в феврале по данным ISOGRIDS изотопный состав атмосферных осадков характеризовался более облегченными значениями (почти на 8 ‰ для  $\delta^{18}\text{O}$  и 63 ‰ для  $\delta\text{D}$ ) (рис. 6). По нашему мнению, выявленные различия для февраля скорее всего обусловлены влиянием испарительного фракционирования в 2016 г., что подтверждают значения положительных температур окружающей среды в период выпадения атмосферных осадков. Вышеуказанная разница в изотопном составе атмосферных осадков может быть связана также и с тем, что сравнивались разные временные интервалы: январь–март 2016 г. – результаты настоящей работы и соответствующие месяцы, но в 1969–1990 гг. – ISOGRIDS.

Сравнения данных изотопного состава атмосферных осадков, представленных в ISOGRIDS для теплого периода (апрель–сентябрь), с данными для предгорий Алтая показали наиболее близкие результаты для апреля, мая и июня (рис. 7), в то время как максимальные отличия наблюдались в июле и сентябре. Полученные различия в значительной степени связаны со сменой регионов-источников поступления атмосферных осадков, что подтверждается данными синоптического анализа.

При сравнении результатов изотопного состава атмосферных осадков октября 2016 г. и данных ISOGRIDS (рис. 8) определены большие различия в изотопном составе. По данным ISOGRIDS атмосферные осадки в предгорьях Алтая характеризуются более утяжеленным изотопным составом, что, скорее всего, объясняется нетипичными для исследуемого района синоптическими условиями октября 2016 г. – выпадение большого количества атмосферных осадков, в первую очередь, в виде снега, что и определило их более облегченный изотопный состав.

Сравнение данных ISOGRIDS и изотопного состава атмосферных осадков, отображенных в предгорьях Алтая в январе–октябре 2016 г., показало хо-

рошую согласованность. Однако отличия наблюдались в феврале, июле, сентябре и октябре, что в значительной степени обусловлено нетипичными синоптическими условиями этих месяцев в 2016 г., а именно – устойчивыми положительными температурами в феврале, аномально высоким количеством осадков в июле и октябре и малым количеством случаев выпадения осадков (более 1 мм) в сентябре.

Онлайн калькулятор, размещенный на портале IsoMAP, дополнительно позволил осуществить анализ ретроспективных данных состава стабильных изотопов в атмосферных осадках, полученных с помощью сети GNIP для исследуемой территории, однако в отличие от ISOGRIDS при интерполяции использовался метод множественной регрессии.

Таблица. Изотопный состав атмосферных осадков в предгорьях Алтая

Table. Isotopic composition of precipitation in Altai foothills

	Средневзвешенные значения 2016 г. Weighted average, 2016		ISOGRIDS		IsoMAP	
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta\text{D}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta\text{D}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta\text{D}$
	‰					
Январь/January	-22,4	-168,7	-20,3	-170,0	-20,6	-164,0
Февраль/February	-17,6	-136,2	-25,4	-199,0	-24,1	-189,0
Март/March	-14,5	-110,0	-18,4	-135,0	-18,1	-136,0
Апрель/April	-13,0	-99,1	-12,1	-83,0	-13,5	-99,0
Май/May	-9,4	-68,8	-10,5	-71,0	-11,8	-85,0
Июнь/June	-8,5	-69,2	-11,1	-77,0	-10,0	-73,0
Июль/July	-7,8	-64,8	-13,9	-99,0	-11,8	-81,0
Август/August	-10,4	-81,9	-12,0	-83,0	-10,7	-76,0
Сентябрь/September	-5,6	-43,7	-13,9	-89,0	-14,4	-100,0
Октябрь/October	-18,1	-137,1	-13,1	-90,0	-15,2	-111,0

Результаты сравнения средневзвешенных значений изотопного состава атмосферных осадков, отображенных в предгорьях Алтая (январь–октябрь 2016 г.), и данных IsoMAP (таблица) показали, что, как и по данным ISOGRIDS, максимальные отличия отмечаются в сентябре и феврале. Выявленные различия менее значимы для февраля, но более значимы для сентября и связаны с особенностями синоптических условий 2016 г. Следует отметить,

что IsoMAP и ISOGRIDS в качестве входных параметров используют одни и те же данные, а именно – данные GNIP, но при этом применяют различные алгоритмы расчетов, что и обусловило схожесть различия с данными наблюдений в 2016 г. по месяцам – максимальные в феврале и сентябре.

#### Заключение

Проведенные исследования изотопного состава атмосферных осадков, отобранных в 2016 г. в предгорьях Алтая в соответствии с рекомендациями GNIP, показали существенное варьирование индивидуальных значений для  $\delta^{18}\text{O}$   $-28,12...+2,78$  ‰ и для  $\delta\text{D}$   $-219,3...-15,0$  ‰, и как следствие – для  $d_{\text{exc}}$   $-37,3...+14,3$  ‰. Данные изотопного состава осадков в совокупности с рассчитанными значениями углов наклонов ЛЛМВ позволяют говорить о преимущественном криогенном фракционировании твердых атмосферных осадков, выпавших в холодные периоды 2016 г., и испарительном фракционировании и/или смене источников поступления осадков в теплый период анализируемого года. Результаты сравнения данных изотопного состава атмосферных осадков, которые в предгорной зоне Ал-

тая впервые отбирались одновременно по двум схемам (индивидуальный отбор и ежемесячный), показали их согласованность, что позволяет при ограниченных условиях применять только ежемесячный отбор проб в соответствии с рекомендациями GNIP. Сопоставление средневзвешенных месячных значений изотопного состава атмосферных осадков с данными значений IsoMAP и ISOGRIDS выявило максимальные отличия в феврале и сентябре. Эти различия связаны с особенностями синоптических (погодных) условий 2016 г., а именно: устойчивыми положительными температурами в феврале, что не типично для исследуемой территории, и малой повторяемостью осадков в сентябре. Полученные результаты изотопного состава атмосферных осадков могут быть использованы как входные параметры при «изотопном» моделировании региональных гидрологических и климатических изменений в предгорьях Алтая, а также в верификации результатов при глобальном моделировании.

*Авторы благодарят старшего научного сотрудника Лаборатории физики атмосферно-гидросферных процессов ИВЭП СО РАН Галину Станиславовну Зинченко за помощь при анализе синоптической ситуации.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joussame S., Sadourny R., Jouzel J. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere // *Nature*. – 1984. – V. 311. – P. 24–29.
2. Delavau C. J., Stadnyk T., Holmes T. Examining the impacts of precipitation isotope input ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ ) on distributed, tracer-aided hydrological modelling // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2017. – V. 21. – P. 2595–2614.
3. Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP). URL: [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html) (дата обращения 01.03.2018).
4. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science*. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
5. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. – 1964. – V. 16. – P. 436–468.
6. Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation. Climate Change in Continental Isotopic Records // *Geophysical Monograph Series*. – 1993. – V. 78. – P. 1–36.
7. Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship in precipitation // *Journal of Geophysical Research*. – 1979. – V. 84. – P. 5029–5033.
8. Fricke H., O'Neil J. The correlation between  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1999. – V. 170. – P. 181–196.
9. Arctic Vortex changes alter the sources and isotopic values of precipitation in northeastern US / T. Puntag, M.J. Mitchell, J.L. Campbell, E.S. Klein, G.E. Likens, J.M. Welker // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. DOI: 10.1038/srep22647.
10. Precipitation isoscapes for New Zealand: enhanced temporal detail using precipitation-weighted daily climatology / W.T. Baisden, E.D. Keller, R. van Hale, R.D. Frew, L.I. Wassenaar // *Isotopes in Environmental and Health Studies*. – 2016. – V. 52. – P. 343–352.
11. Kern Z., Kohán B., Leuenberger M. Precipitation isoscape of high reliefs: interpolation scheme designed and tested for monthly resolved precipitation oxygen isotope records of an Alpine domain // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – V. 14. – P. 1897–1907.
12. Dietermann N., Weiler M. Spatial distribution of stable water isotopes in alpine snow cover // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2013. – V. 17. – P. 2657–2668.
13. Zhang M., Wang S. A review of precipitation isotope studies in China: Basic pattern and hydrological process // *Journal of Geographical Sciences*. – 2016. – V. 26. – P. 921–938.
14. Wang T., Chen J., Li L. Entropy analysis of stable isotopes in precipitation: tracing the monsoon systems in China // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. DOI: 10.1038/srep30389.
15. Temporal variations of accumulation and temperature during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai / K. Henderson, A. Laube, H.W. Gaggeler, S. Olivier, T. Papina, M. Schwikowski // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – V. 111. – D03104. DOI: 10.1029/2005JD005819.
16. Stable isotopes time series and precipitation origin from the Altai glaciers, Siberia, recovered from firn-cores and snow samples / V.B. Aizen, E.M. Aizen, K. Fujita, S.A. Nikitin, K. Kreutz // *Journal of Glaciology*. – 2005. – V. 51. – P. 637–654.
17. Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt El'brus ice cores / A. Kozachek, V. Mikhailenko, V. Masson-Delmotte, A. Ekaykin, P. Ginot, S. Kutuzov, M. Legrand, V. Lipenkov, S. Preunkert // *Climate of the Past*. – 2017. – V. 13. – P. 473–489.
18. Пространственно-временные вариации изотопного состава кислорода атмосферных осадков и речных вод на территории северной части Евразии и их связь с изменением температуры / В.С. Брезгунов, А.Д. Евсиков, В.И. Ферронский, Л.В. Сальнова // *Водные ресурсы*. – 1998. – Т. 25. – № 1. – С. 99–104.
19. Relationship between the variation of isotopic ratios and the source of summer precipitation in eastern Siberia / N. Kurita, A. Numaguti, A. Sugimoto, K. Ichinaga, N. Yoshi-da // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – V. 108. – D11339. DOI: 10.1029/2001JD001359.
20. Васильчук Ю.К. Новые данные о тенденции и причинах изменения величины дейтериевого эксцесса в едином снегопаде // *ДАН*. – 2014. – Т. 459. – № 1. – С. 109–111.

21. Содержание  $^{18}\text{O}$  в атмосферных осадках Москвы в 2014 г. / Ю.Н. Чинова, И.Д. Еремина, Н.А. Буданцева, Г.В. Суркова, Ю.К. Васильчук // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 1. – С. 78–90.
22. Васильчук Ю.К., Чинова Ю.Н. Высотный градиент распределения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  в атмосферных осадках и в снежном покрове высокогорных районов // Криосфера Земли. – 2010. – Т. 14. – № 1. – С. 13–21.
23. Denisova N.Y., Gribov K.G., Werner M. Comparison of the isotopic composition of precipitation and air for three Arctic stations with the results of the ECHAM5-wiso modeling // 23<sup>rd</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2017. – V. 10466. DOI: 10.1117/12.2288311.
24. Изотопный состав зимних атмосферных осадков и снежного покрова в предгорьях Алтая / Н.С. Малыгина, А.Н. Эйрих, Н.Ю. Курепина, Т.С. Папина // Лёд и Снег. – 2017. – Т. 57. – № 1. – С. 57–68.
25. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии / Т.С. Папина, Н.С. Малыгина, А.Н. Эйрих, А.А. Галанин, М.Н. Железняк // Криосфера Земли. – 2017. – Т. XXI. – № 2. – С. 60–69.
26. Delavau C.J., Stadnyk T., Holmes T. Examining the impacts of precipitation isotope input ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ ) on distributed, tracer-aided hydrological modelling // Hydrology and Earth System Sciences. – 2017. – V. 21. – P. 2595–2614.
27. Галахов В.П., Губарев М.С., Назаров А.Н. Водный баланс бессточных озерно-речных систем Обь-Иртышского междуречья (в пределах Алтайского края). – Барнаул: Изд-во Алтайский государственный университет, 2010. – 112 с.
28. Экстремальный дождевой паводок 2014 г. в бассейне Верхней Оби: причины, прогноз и натурные наблюдения / А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, А.В. Дьяченко, А.А. Коломейцев // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. – 2015. – № 6. – С. 93–104.
29. Люцигер А.Ю. Аномальный паводок 2014 года на Алтае // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2014. – С. 118–129.
30. Расписание погоды. URL: <http://rp5.ru/docs/about/ru> (дата обращения 18.09.2017).
31. NOAA Earth System Research Laboratory. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/> (дата обращения 22.10.2017).
32. Department of Nuclear Sciences and Applications. URL: <http://www.naweb.iaea.org> (дата обращения 13.12.2017).
33. IsoMAP. URL: <http://isomap.rcac.purdue.edu:8080/gridsphere/gridsphere> (дата обращения 02.12.2017).

Поступила 30.08.2018 г.

#### Информация об авторах

**Малыгина Н.С.**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН; доцент географического факультета Алтайского государственного университета.

**Эйрих А.Н.**, кандидат технических наук, научный сотрудник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН.

**Курепина Н.Ю.**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Лаборатории водных ресурсов и водопользования Института водных и экологических проблем СО РАН.

**Папина Т.С.**, доктор химических наук, начальник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН.



UDC 551.577.13:546.21(470.311)

## ISOTOPIC COMPOSITION OF PRECIPITATION IN ALTAI FOOTHILLS: OBSERVATION AND INTERPOLATION DATA

Natalia S. Malygina<sup>1,2</sup>,  
natmgn@gmail.com

Alla N. Eirikh<sup>1</sup>,  
allnik608@gmail.com

Nadezhda Yu. Kurepina<sup>1</sup>,  
nyukurepina@mail.ru

Tatiana S. Papina<sup>1</sup>,  
tanya.papina@mail.ru

<sup>1</sup> Institute for Water and Environmental Problems SB RAS,  
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

<sup>2</sup> Altai State University,  
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

**Relevance.** In recent years, the ratios of oxygen and hydrogen stable isotopes in precipitation obtained from the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) have been widely used as reliable markers of current and predicted climatic and hydrological changes. However, for the vast territory of Russia such data sets are essentially limited both in space and in time. One of the most promising study areas is the Altai foothills subjected to significant hydrological and climatic changes in the last decades.

**The aim** of the research is to assess the changes in isotopic composition of precipitation sampled in the Altai foothills during the study period in accordance with the GNIP recommendations, and to compare the assessment results with the interpolated GNIP data on the adjacent territories.

**Methods.** Precipitation was sampled in accordance with the GNIP criteria. The synoptic analysis was supported by the meteorological data from the nearest «Roshydromet» weather station. The isotopic analysis of precipitation was performed by means of laser absorption IR spectrometry on PICARRO L2130-i device. The obtained results were compared with the interpolated GNIP data for the Altai foothills calculated with the use of ISOtopic GRIdded Rainfall Data Software (ISOGRIDS) and Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction (IsoMAP).

**Results.** The analysis of isotopic composition of precipitation sampled in accordance with GNIP requirements in the Altai foothills in 2016 indicated its significant variation. The comparison of isotopic composition of precipitation simultaneously sampled in the study area using two schemes (daily and monthly sampling) shows good correlation; under limited conditions, just monthly sampling is probable. The comparison of weighted average monthly values of isotopic composition of the observed atmospheric precipitation and of that calculated by IsoMAP suggests maximum differences in February and September that is true for comparison with ISOGRIDS data as well. The revealed differences are related to the synoptic peculiarities of 2016, namely, atypically stable positive temperature in February and insignificant precipitation recurrence (more than 1 mm) in September.

### Key words:

Precipitation, isotopic composition, observation data, interpolation data, Altai foothills.

The authors appreciate Galina S. Zinchenko, a researcher of the Laboratory of Atmosphere-Hydrosphere Physics IWEP SB RAS, for synoptic situation analysis.

### REFERENCES

1. Joussaume S., Sadourny R., Jouzel J. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere. *Nature*, 1984, vol. 311, pp. 24–29.
2. Delavau C. J., Stadnyk T., Holmes T. Examining the impacts of precipitation isotope input ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ ) on distributed, tracer-aided hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, pp. 2595–2614.
3. *Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP)*. Available at: [http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html) (accessed 1 March 2018).
4. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
5. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, vol. 16, pp. 436–468.
6. Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records. Geophysical Monograph Series*, 1993, vol. 78, pp. 1–36.
7. Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship in precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 1979, vol. 84, pp. 5029–5033.
8. Fricke H., O'Neil J. The correlation between  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, vol. 170, pp. 181–196.
9. Puntag T., Mitchell M.J., Campbell J.L., Klein E.S., Likens G.E., Welker J.M. Arctic Vortex changes alter the sources and isotopic values of precipitation in northeastern US. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6. DOI: 10.1038/srep22647.
10. Baisden W.T., Keller E.D., Van Hale R., Frew R.D., Wassenaar L.I. Precipitation isoscapes for New Zealand: enhanced temporal detail using precipitation-weighted daily climatology. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2016, vol. 52, pp. 343–352.
11. Kern Z., Kohán B., Leuenberger M. Precipitation isoscape of high reliefs: interpolation scheme designed and tested for monthly resolved precipitation oxygen isotope records of an Alpine domain.

- Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, vol. 14, pp. 1897–1907.
12. Dietermann N., Weiler M. Spatial distribution of stable water isotopes in alpine snow cover. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol. 17, pp. 2657–2668.
  13. Zhang M., Wang S. A review of precipitation isotope studies in China: Basic pattern and hydrological process. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, vol. 26, pp. 921–938.
  14. Wang T., Chen J., Li L. Entropy analysis of stable isotopes in precipitation: tracing the monsoon systems in China. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6. DOI: 10.1038/srep30389.
  15. Henderson K., Laube A., Gaggeler H.W., Olivier S., Papina T., Schwikowski M. Temporal variations of accumulation and temperature during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai. *Journal of Geophysical Research*, 2006, vol. 111, D03104. DOI: 10.1029/2005JD005819.
  16. Aizen V.B., Aizen E.M., Fujita K., Nikitin S.A., Kreutz K. Stable isotopes time series and precipitation origin from the Altai glaciers, Siberia, recovered from firn-cores and snow samples. *Journal of Glaciology*, 2005, vol. 51, pp. 637–654.
  17. Kozachek A., Mikhaleiko V., Masson-Delmotte V., Ekaykin A., Ginot P., Kutuzov S., Legrand M., Lipenkov V., Preunkert S. Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt El'brus ice cores. *Climate of the Past*, 2017, vol. 13, pp. 473–489.
  18. Brezgunov V.S., Evisikov A.D., Ferronskiy V.I., Salnova L.V. Spatio-temporal variations of the isotope composition oxygen of atmospheric precipitation and river water in the territory of the northern part of Eurasia and their relationship with temperature change. *Water resources*, 1998, vol. 25, pp. 99–104. In Rus.
  19. Kurita N., Numaguti A., Sugimoto A., Ichiyana K., Yoshi-da N. Relationship between the variation of isotopic ratios and the source of summer precipitation in eastern Siberia. *Journal of Geophysical Research*, 2003, vol. 108, D11339. DOI: 10.1029/2001JD001359.
  20. Vasilchuk Y.K. New date on the tendency and causes of deuterium excess variations during one snowfall. *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 459, pp. 109–111. In Rus.
  21. Chizhova Yu.N., Eremina I.D., Budantseva N.A., Surkova G.V., Vasilchuk Yu.K. Concentration of  $^{18}\text{O}$  in precipitation over Moscow in 2014. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, vol. 41, pp. 78–90. In Rus.
  22. Vasilchuk Yu.K., Chizhova Ju.N. Altitudinal gradient of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in precipitation and snow cover in high mountains. *Earth's Cryosphere*, 2010, vol. 14, pp. 13–21. In Rus.
  23. Denisova N.Y., Gribanov K.G., Werner M. Comparison of the isotopic composition of precipitation and air for three Arctic stations with the results of the ECHAM5-wiso modeling. *23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2017, vol. 10466. DOI: 10.1117/12.2288311.
  24. Malygina N.S., Eirikh A.N., Kurepina N.Yu., Papina T.S. Isotope composition of winter precipitation and snow cover in the foothills of the Altai. *Ice and snow*, 2017, vol. 57, pp. 57–68. In Rus.
  25. Papina T.S., Malygina N.S., Eirikh A.N., Galanin A.A., Zheleznyak M.N. Isotopic composition and sources of atmospheric precipitation in Central Yakutia. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, pp. 60–69. In Rus.
  26. Delavau C.J., Stadnyk T., Holmes T. Examining the impacts of precipitation isotope input ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$ ) on distributed, tracer-aided hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, pp. 2595–2614.
  27. Galakhov V.P., Gubarev M.S., Nazarov A.N. *Vodny balans besstokhnykh ozerno-rechnykh sistem Ob-Irtyshskogo mezhdurechya (v predelakh Altayskogo kraya)* [Water balance of the drainless lake-river systems of the Ob-Irtysh interfluvium (within the Altai Territory)]. Barnaul, ASU Publ., 2010. 112 p.
  28. Zinoviev A.T., Koshelev K.B., Dyachenko A.V., Kolomeitsev A.A. Extreme Rainfall and Flood Event of 2014 in the Upper Ob River Basin: Causes, Prediction and Field Observations. *Water management in Russia. Problems, technologies, management*, 2015, vol. 6, pp. 93–104. In Rus.
  29. Lyuciger A.Yu. Anomally pavodok 2014 goda na Altae [The abnormal flood of 2014 in the Altai]. *Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Tsentralnoy Azii. Trudy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Water and ecological problems in Siberia and Central Asia. Proc. of All-Russian scientific conference with International participation]. Barnaul, IWEP SB RAS, 2014. pp. 118–129.
  30. *Raspisanie pogody* [Weather schedule]. Available at: <http://rp5.ru/docs/about/ru> (accessed 18 September 2017).
  31. NOAA Earth System Research Laboratory. Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/> (accessed 22 October 2017).
  32. Department of Nuclear Sciences and Applications. Available at: <http://www.naweb.iaea.org> (accessed 13 December 2017).
  33. IsoMAP. Available at: <http://isomap.rcac.purdue.edu:8080/gridsphere/gridsphere> (accessed 02 December 2017).

Received: 30 August 2018.

#### Information about the authors

**Natalia S. Malygina**, Cand. Sc., senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS; associate professor, Altai State University.

**Alla N. Eirikh**, Cand. Sc., researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

**Nadezhda Yu. Kurepina**, Cand. Sc., senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

**Tatiana S. Papina**, Dr. Sc., principal researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

УДК 551.58+551324.63

## ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАЙОНОВ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

Севастьянов Владимир Вениаминович<sup>1</sup>,  
vvs187@mail.ru

Сапьян Екатерина Сергеевна<sup>1</sup>,  
Katerinass@vtomske.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность исследования.** Среди наиболее острых проблем, волнующих человечество, следует выделить энергетические проблемы. Они влияют непосредственно или опосредованно на человека, общество и окружающую среду. Человеческая деятельность связана с непрерывным использованием природных энергоресурсов для обеспечения своей жизнедеятельности: теплом и светом в домах, продуктами питания, транспортом, одеждой и т. д. До настоящего времени во многих районах Сибири отсутствуют централизованное энергоснабжение. Важной особенностью горных стран является большое рассредоточение потребителей электрической и тепловой энергии, неравномерная нагрузка в течение года и отсутствие централизованных источников энергии. Основным видом энергоисточников в горных районах являются дизельные электростанции. Стоимость получаемой энергии очень велика, особенно в отдалённых районах. Решение энергетической проблемы станет возможным лишь благодаря концепции освоения горных регионов с использованием возобновляемых источников энергии. В работе рассмотрены основные закономерности ветроэнергетического потенциала центральных районов Республики Алтай. Для выбора оптимального режима работы ветроэнергетических установок, исходя из мощности электрических нагрузок, а также данных, необходимых для конструирования, расчётов, оценки прочности требуются дополнительные исследования, в том числе микроклиматические наблюдения за ветровым режимом.

**Цель:** оценить возможный вклад энергии ветра в энергоэффективность и улучшение экологических условий в горных районах Республики Алтай при интенсивном развитии туристско-рекреационной деятельности.

**Объекты:** ветровой режим в нижней тропосфере над югом Сибири; орографические условия и их влияние на ветровой режим; ветроэнергетический потенциал среднегорных районов Республики Алтай.

**Методы:** температурно-ветровое зондирование атмосферы; построение математической модели поля скорости ветра в нижней тропосфере на различных высотных уровнях; оценка и анализ влияния различных форм рельефа на скорость ветра.

**Результаты.** Показано, что в условиях межгорных котловин и широких долин скорости ветра малы для развития ветроэнергетики. Анализ аэроклиматических показателей скорости ветра и данные высокогорных метеорологических станций на вершинах и водоразделах показали, что в условиях открытости горизонта ветроэнергетический потенциал достаточен для эффективной работы ветроэнергетических установок различной мощности. Для водораздельных участков выше 1500 м удельная мощность ветрового потока составляет от 150 до 850 Вт/м<sup>2</sup>, что позволяет эксплуатировать ветроэнергетические установки малой и средней мощности. За зону большой энергетики могут быть приняты районы с удельной мощностью ветрового потока более 500 Вт/м<sup>2</sup>. Такая зона может быть выделена в центральной части Горного Алтая, начиная примерно с 2200 м.

### Ключевые слова:

Ветер, скорость ветра, энергоресурсы, ветроэнергетический потенциал, Алтай, ветроэнергетическая установка.

### Введение

Экономическое развитие Республики Алтай предусматривает дальнейшее развитие промышленности, сельскохозяйственного производства, туризма, энергетики.

Главной задачей экономического развития должно быть сохранение благоприятных экологических условий природной среды. Основное внимание направлено на развитие рекреации и туризма в регионе, а также на развитие энергетической базы республики, поскольку до настоящего времени она остается энергодефицитной и предусматривает поступление энергии из соседних регионов. Главным направлением в развитии энергетики является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). За короткое время построены мощные геотермальные станции в поселке Яйлю на Телецком озере, в районном центре Кош-Агач в Чуйской степи, в Усть-Канской степи, в селе Майма.

Существуют планы создания малых и микрогидроэлектростанций на горных реках.

Для горных территорий Алтая значительный интерес представляет оценка потенциальных ветроэнергетических ресурсов для выработки электрической энергии. Этот путь увеличения энергетического потенциала территории за счет ВИЭ является самым экономичным и экологически безвредным.

### Исходные материалы, методика исследований

Для изучения ветрового режима были использованы данные многолетних наблюдений за скоростью ветра на сети метеорологических станций Росгидромета в Республике Алтай, справочники [1, 2], ежемесячники, данные ВНИИГМИ-МЦД. Были использованы материалы аэроклиматических справочников [3] и ежемесячников для характеристики ветрового режима в свободной атмосфере по данным сети аэрологических станций (Новосибирск, Семипалатинск, Красноярск, Хакасская, Кызыл, Барнаул). Численный анализ ветрового режима по многолетним данным аэрологи-

ческих станций позволил получить математическую модель поля ветра (полином первой степени), что дает возможность оценить распределение его скорости в верхнем поясе гор: на водоразделах в разных частях склонов, в долинах и котловинах при отсутствии наземных метеорологических данных.

Для учета влияния на ветровой режим орографических условий учитывались морфологические характеристики рельефа: абсолютная и относительная высота склонов, их экспозиция по отношению к преобладающему ветровому потоку. С этой целью использовались географические карты рельефа и орографические схемы Республики Алтай.

### Результаты исследования

Движения воздуха в атмосфере определяют огромные экологически чистые энергетические ресурсы [4–6]. Однако использование их в качестве источника энергии представляет сложную комплексную проблему [7–10], которая находится на стыке техники, экономики, метеорологии, экологии и других наук. Решением ее занимается ветроэнергетика, теоретические основы которой были заложены еще в начале прошлого века в период зарождения и быстрого развития авиации.

Для территории России и Сибири, в частности, выполнен ряд исследований по оценке ветроэнергетических ресурсов [4, 5, 11]. Во всех перечисленных работах горные районы Алтая оцениваются как совершенно неперспективные для развития ветроэнергетики, или их относят к малоисследованным с этой точки зрения районам. Такой вывод представляется закономерным, так как метеорологические станции, по данным которых оценивается ветроэнергетический потенциал, располагаются в основном в межгорных котловинах или в широких долинах, то есть в условиях с ослабленным воздухообменом. В табл. 1 приведены средние месячные скорости ветра в центральные месяцы сезонов года и средние годовые скорости ветра на станциях Горного Алтая, расположенных в горных котловинах. Станция Аккем расположена в высокогорной горноледниковой долине. Станция Кара-Тюрек, самая высокогорная в России, располагается на водораздельном участке отрога Катунского хребта с высокой степенью открытости горизонта.

Более половины всех станций показывают среднюю годовую скорость ветра менее 2 м/с. Кроме того, следует учитывать, что в холодный период года, когда особенно остро встает вопрос об обеспечении энергией, над Сибирью располагается обширный сибирский антициклон, характеризующийся небольшими градиентами давления, мощной температурной инверсией и устойчивостью атмосферы. Все это сказывается на уменьшении скорости ветра, особенно у земной поверхности и, соответственно, на уменьшении ветроэнергетического потенциала.

На открытых высоких склонах и на водоразделах наблюдаются значительно большие скорости

ветра. Примером могут служить данные на станции Кара-Тюрек (табл. 1). Относительно большие скорости ветра наблюдаются в долинах, где отмечается большая повторяемость местных воздушных течений: фёновых, ледниковых, горно-долинных ветров [6, 11].

Таблица 1. Средние месячные и годовые скорости ветра (м/с) [1, 2]. Горный Алтай

Table 1. Average monthly and annual wind speed (m/s) [1, 2]. Gorny Altai

Станция, высота над уровнем моря, м Station, height above sea level, m	Месяц/Month				Год Year
	I	IV	VII	X	
Усть-Кан (Ust-Kan), 1037	2,4	3,2	2,6	2,9	2,8
Онгудай (Onguday), 832	0,5	1,8	1,3	1,0	1,1
Усть-Кокса (Ust-Koksa), 978	1,0	2,3	1,6	1,9	1,7
Катанда (Katanda), 900	1,5	2,1	1,6	1,8	1,8
Аккем (Akkem), 2050	2,0	2,9	2,1	2,7	2,4
Кара-Тюрек (Kara-Tyurek), 2600	6,6	6,2	4,3	7,7	6,2

Для оценки ветроэнергетического потенциала верхнего пояса гор были использованы пространственно-временные характеристики поля ветра в нижней тропосфере над центральными районами Горного Алтая по аэроклиматическим данным [3]. Годовой ход скорости ветра в тропосфере над Алтаем можно проследить на рис. 1.

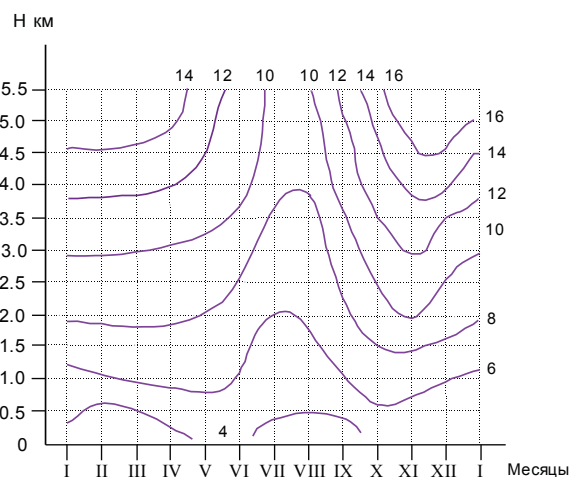


Рис. 1. Изотахи средней месячной скорости ветра (м/с) в нижней тропосфере [12]. Центральный Алтай

Fig. 1. Isotachs of average monthly wind speed (m/s) in the lower troposphere [12]. Central Altai

Максимальные скорости ветра наблюдаются в переходные сезоны года, причем максимум в ноябре составляет на высоте 5000 м 17,7 м/с, а в апреле – лишь 15,6 м/с. Такие особенности прослеживаются и на ниже лежащих уровнях. Амплитуда годового хода скорости ветра с высотой резко увеличивается от 1 м/с на высоте 500 м до 9 м/с на высоте 5000 м. Увеличение амплитуды скорости ветра с высотой объясняется ослаблением силы трения по мере удаления от подстилающей поверхности.

Ветры в условиях свободной атмосферы, как известно, достаточно близко характеризуют ветро-



вой режим на вершинах, на открытых водораздельных участках. Однако полностью отождествлять данные по флюгеру на метеорологических станциях, находящихся на водоразделах, с условиями свободной атмосферы нельзя, так как шероховатость подстилающей поверхности заметно уменьшает скорость ветра.

Для количественной оценки влияния на скорость ветра подстилающей поверхности на водоразделах, на склонах различной ориентации по отношению к преобладающему направлению ветра, а также в долинах и котловинах проводилось сравнение данных фактических наблюдений с расчетными значениями скорости ветра [12].

Отношение скорости ветра по флюгеру к расчетной скорости характеризуется коэффициентом  $K$ .

$$K = V_{\text{фл}} / V_{\text{расч}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{фл}}$  – средняя месячная скорость ветра по флюгеру, м/с;  $V_{\text{расч}}$  – средняя месячная скорость ветра расчётная, м/с.

Изменения в течение года коэффициента  $K$ , рассчитанного по формуле (1), на станциях, расположенных в верхнем поясе гор в условиях открытости горизонта в Алтае-Саянском регионе и на Кавказе, приведены на рис. 2.

Отношения фактических скоростей ветра к расчетным на высокогорных станциях, приведенные на рис. 2, изменяются в течение года очень незначительно. Это подтверждает высокую степень связности ветрового режима на высокогорных станциях с условиями свободной атмосферы.

Несколько большие значения коэффициента  $K$  можно отметить в холодный период года. Близость значений коэффициента  $K$  в разные месяцы позволяет использовать для станций единую среднюю годовую величину  $K$ . Значения коэффициента  $K$  близки по своим значениям как на больших высотах (станция Кара-Тюрек, 2600 м), так и на вершинах в низкогорных и среднегорных районах (станция Северный поселок, 793 м). Данные по Кавказским станциям также подтверждают этот вывод.

На отдельных метеорологических станциях выделяются периоды со скоростью ветра, превышающей его значения в свободной атмосфере на том же уровне. Особенно это характерно для холодного периода года. Такие орографические условия вызывают большой интерес и требуют специальных анемометрических и аэрологических исследований. Можно предположить, что такие зоны с усилением ветра носят локальный характер и относятся лишь к узким зонам в районах перевалов, между горными проходами. Значительные усиления ветра относительно условий свободной атмосферы наблюдаются также в районах с очень интенсивным развитием фёнов.

Следует заметить, что для оценки влияния орографии, в частности склонов, могут быть использованы данные специальных микроклиматических наблюдений. Этим вопросам уделялось существенное внимание в работах [13–17]. Эти исследования

относятся в основном к низкогорной или холмистой местности и к кратковременным периодам наблюдений. В этих работах приводятся поправочные коэффициенты на скорость ветра относительно скорости ветра на открытой равнинной местности.

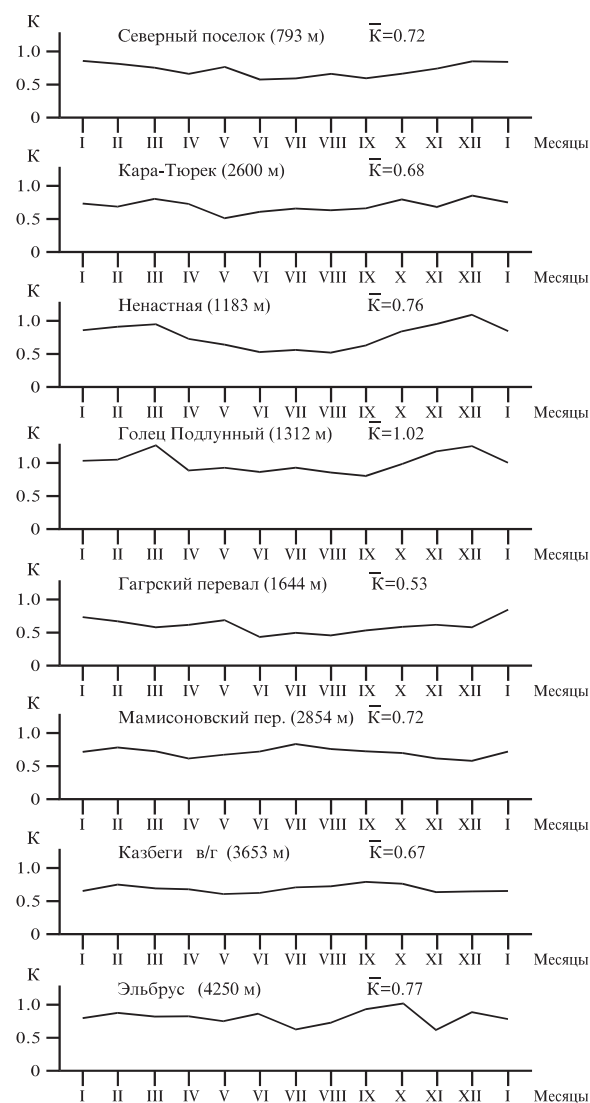


Рис. 2. Годовой ход коэффициента  $K$  на вершинах и на водоразделах

Fig. 2. Annual variations of the coefficient  $K$  on vertices and on watersheds

Совместный анализ сведений, содержащихся в литературных источниках, и экспериментальных данных об изменчивости скорости ветра в различных формах рельефа позволяет определить коэффициенты уменьшения скорости ветра по сравнению со скоростью ветра в условиях свободной атмосферы на той же высоте над уровнем моря (табл. 2). Использование этих коэффициентов дает возможность оценить наиболее вероятные средние скорости ветра в местах, где не было наблюдений за ветровым режимом.

**Таблица 2.** Отношение ( $K$ ) средней месячной скорости ветра на высоте флюгера в различных формах рельефа к скорости ветра в свободной атмосфере

**Table 2.** Ratio of the average monthly wind speed at the height of the vane in various forms of relief to the wind speed in the free atmosphere ( $K$ )

Характеристика рельефа/Characteristics of the terrain	$K$
Вершины и возвышенности/Tops and hill	0,7
Хорошо выраженный наветренный склон Pronounced windward slope	0,4–0,5
Подветренный склон/Leeward slope	0,3–0,4
Склон, параллельный ветру/Slope parallel to wind	0,4–0,5
Горные долины поперечные/Mountain valley cross	0,3
Горные долины продольные/Mountain valley longitudinal	0,4–0,5
Котловины/Depression	0,2–0,3

Заметим, что приведенные коэффициенты  $K$  являются осредненными за год и могут быть дифференцированы в зависимости от времени года. На открытых возвышенностях и на вершинах величина отношения  $K$  в течение года практически не меняется.

Таким образом, определение средних месячных значений скорости ветра для оценки потенциальных ветроэнергетических ресурсов в Центральном Алтае на водораздельных участках, на склонах и в других орографических условиях возможно при использовании характеристик ветрового режима в нижней тропосфере. Средняя погрешность интерполяции скорости ветра на высоте 3000 м над уровнем моря на независимом материале над станцией Барнаул составила  $0,3 \pm 0,2$  м/с в тёплый период и  $1,0 \pm 0,6$  м/с в холодный период года.

Климатическую информацию, используемую для составления ветроэнергетического кадастра, можно подразделить на три вида.

К первому виду информации относятся климатические характеристики, используемые при оценке ветроэнергетического потенциала. Сюда входят: средняя многолетняя скорость ветра в целом за год и по месяцам, суточный ход скорости ветра в разные сезоны, повторяемость скорости ветра по грациям в разные сезоны или месяцы года, вертикальные профили скорости ветра, коэффициенты, учитывающие изменение скорости ветра в пространстве под влиянием макро- и мезоэнеоднородностей подстилающей поверхности.

Второй вид информации представляют данные, необходимые для выбора оптимального режима работы ветроэнергетических установок (ВЭУ). Это, прежде всего, сведения о непрерывной продолжительности скорости ветра выше заданного значения и о так называемых «энергетических затишьях», т. е. о скорости ветра ниже уровня, начиная с которого происходит реальная выработка электрической энергии (уровень определяется техническими особенностями ВЭУ).

К третьему виду климатической информации относятся климатические характеристики, необходимые для конструирования ВЭУ, т. е. для расчетов их прочности и устойчивости. Сюда входят: расчетная максимальная скорость ветра редкой

повторяемости, данные о порывах ветра, параметрах турбулентности атмосферы в данном районе и другие характеристики.

На данном этапе исследований пойдет речь только о предварительной оценке ветроэнергетического потенциала верхнего пояса гор на территории Центрального Алтая. Аэроклиматическая информация не обеспечивает возможности получения подробных ветроэнергетических характеристик (мала частота зондирования атмосферы, получение некоторых показателей возможно лишь косвенными методами, например, максимальные порывы ветра, продолжительность периодов затиший и т. д.). Поэтому основная задача авторов – привлечь внимание различных специалистов к оценке средних скоростей ветра в условиях орографической открытости и показать перспективность развития ветроэнергетики, поскольку этот показатель является одним из основных для оценки энергоресурсов.

В качестве примера приведем средние месячные скорости ветра в различных формах рельефа на разных высотах в Центральном Алтае (табл. 3).

**Таблица 3.** Средние месячные и годовые скорости ветра на водоразделах и на наветренных склонах, на разных высотах Теректинского, Семинского и Куминского хребтов. Центральный Алтай

**Table 3.** Average monthly and annual wind speed on watersheds and on the windward slopes, at different altitudes of Terektinsky, Seminsky and Kuminsky ranges. Central Altai

Орографические условия Orographic conditions	Высота, м Height, m	Месяц Month				Холодный период Cold period	Теплый период Warm period	Год/Year
		I	IV	VII	X			
Водоразделы Watersheds	1000	3,7	3,9	3,7	4,3	4,1	3,9	4,0
	1500	4,3	4,5	3,8	5,1	4,8	4,1	4,5
	3000	6,8	6,7	4,8	6,8	7,2	5,8	6,5
Наветренные склоны Windward slopes	1000	2,7	2,9	2,7	3,2	3,1	2,9	3,0
	1500	3,2	3,3	2,8	3,6	3,5	3,0	3,3
	3000	5,0	5,0	3,5	5,0	5,3	4,3	4,8

В настоящее время условия экономически оправданной эксплуатации ВЭУ в зависимости от среднегодовой скорости ветра ( $V_c$ ) можно приблизительно оценить следующим образом [11]:

- при  $V_c < 2,5$ –3 м/с – бесперспективные;
- при  $3 \leq V_c < 3,5$  м/с – малоперспективные;
- при  $3,5 \leq V_c < 4,0$  м/с – перспективные для ВЭУ малой мощности;
- при  $4 \leq V_c < 5,5$  м/с – перспективные для малой и большой мощности;
- при  $V_c \geq 5,5$  м/с – перспективные для всех ВЭУ.

В табл. 4 представлено несколько ВЭУ малой мощности (до 30 кВт) и их основные технические характеристики. Они могут использоваться в индивидуальной жилой застройке, в том числе в фермерском хозяйстве.

Одним из важнейших показателей ветроэнергетических ресурсов является потенциальная удель-

ная мощность ветрового потока, которая может быть рассчитана по одной из приближённых формул (2) [11],

$$N_e = 1,16V^3, \quad (2)$$

где  $N_e$  – удельная мощность ветрового потока (Вт/м<sup>2</sup>);  $V$  – средняя скорость ветра, м/с.

**Таблица 4.** Технические характеристики ВЭУ (мощность до 30 кВт) [18]

**Table 4.** Technical characteristics of wind turbines (power up to 30 kW) [18]

Марка агрегата Brand Assembly	Диаметр ветроколеса, м Propeller diameter, m	Высота до оси ветроколеса, м Height to the propeller axis, m	Масса ветроколеса, кг Propeller weight, kg	Мощность, кВт Power, kW	Диапазон рабочих скоростей, м/с Operating speed range, m/s
ВЭТУ-1,5	1,8–2,5	4,2; 7,2; 10,2	150	–	5–40
АВЭУ-0,3–2,4	2,4	6,0	165	0,6–0,7	≥3
АВЭ-2–4,5	4,5	8,3	600	2,2	4–40
ВД-6	5,5	17,8	1500	3,0	≥3
ВЭУ-10–10	10,0	11,6	2800	18,5	–
ЭСО-0020	–	–	–	20,0	≥5

Для размещения ВЭУ благоприятными являются следующие условия:

- высокий ветроэнергетический потенциал. В первом приближении его можно характеризовать величиной средней годовой скорости ветра  $\bar{V}_c \geq 5$  м/с на высоте 10 м (средняя высота флюгера или анеморумбометра) над подстилающей поверхностью;
- относительная продолжительность диапазона рабочих скоростей ветра составляет не менее 0,4 в течение сезона;
- район для размещения ВЭУ должен характеризоваться небольшой повторяемостью энергетических затиший, т. е. общая продолжительность периода со скоростью ветра менее 5 м/с не должна превышать 20–30 %;
- небольшие значения коэффициента вариации скорости ветра.

Близкие к вышеизложенным условия в исследуемом районе могут наблюдаться лишь на водораздельных участках, на верхних участках наветренных склонов.

Практическое значение фоновых величин скорости ветра состоит в том, что они позволяют определить удельную мощность ВЭУ, расположенных на открытой местности, на водоразделах. Если в этом же районе можно разместить ВЭУ в более благоприятных орографических условиях (на вершинах или на верхней части наветренных склонов), то необходимо вводить поправки на увеличение удельной мощности. Максимумы удельной мощности ветра приурочены к переходным сезонам, основным минимумом относится к летнему периоду и вторичный – к зимнему.

По аэроклиматическим данным о скорости ветра в свободной атмосфере были рассчитаны сред-

ние месячные скорости ветра и удельная мощность для водораздельных участков на разных высотных уровнях для Центрального Алтая (табл. 5).

Различные высотные уровни водораздельных участков и наветренных склонов оценены по степени перспективности для размещения ВЭУ (табл. 6).

**Таблица 5.** Средние годовые характеристики ветроэнергетических ресурсов на водоразделах и наветренных склонах. Центральный Алтай

**Table 5.** Average annual characteristics of wind energy resources on watersheds and windward slopes. Central Altai

Орографические условия Orographic conditions	Высота, м Height, m	$\bar{V}_c$ , м/с m/s	$V_{расч}$ , м/с m/s	$F(v)$ %	$N_e$ , Вт/м <sup>2</sup> W/m <sup>2</sup>	Степень перспективности, баллы Prospects degree
Водоразделы Watersheds	1500	4,6	–	–	113	2
	2000	5,2	–	–	163	2
	2500	5,8	53	58,7	263	1
	3000	6,5	–	–	319	1
Наветренные склоны Windward slopes	1500	3,3	–	–	42	4
	2000	3,7	–	–	59	3
	2500	4,1	–	–	80	3
	3000	4,5	–	–	102	3

**Примечание.** Характеристика степени перспективности использования ВЭУ приведена в табл. 6. Здесь  $\bar{V}_c$  – средняя годовая скорость ветра;  $V_{расч}$  – максимальная скорость ветра, возможная один раз в 10 лет;  $F(v)$  – обеспеченность скорости ветра 3 м/с и более;  $N_e$  – средняя удельная мощность ветрового потока.

**Note:** Characteristic of the degree of prospects for using wind turbines is shown in table 6, where  $\bar{V}_c$  is the average annual wind speed;  $V_{расч}$  is the maximum wind speed, possible once every 10 years;  $F(v)$  is the wind speed provision 3 m/s or more;  $N_e$  is the average density power of the wind flow.

**Таблица 6.** Характеристика степени перспективности территории для размещения ветроэнергетических установок

**Table 6.** Prospect degree of the site to accommodate wind turbines

Характеристика степени перспективности Prospects degree	$\bar{V}_c$ , м/с m/s	$F(v)$ %	$N_e$ , Вт/м <sup>2</sup> W/m <sup>2</sup>
1 балл. Перспективные в течение года 1 point. Perspective throughout the year	4,0	55	200–1550
2 балла. Перспективные в определенные сезоны года 2 points. Promising in certain seasons of the year	3,5–4,0	45–55	150–200
3 балла. Малоперспективные 3 points. Unpromising	2,0–3,5	25–45	50–150
4 балла. Совершенно неперспективные 4 points. Absolutely unpromising	≤2,0	≤25	≤50

Анализ скоростей ветра на открытых вершинах и водоразделах показывает, что в таких формах рельефа ветровой режим различается по сравнению с данными долинных и котловинных метеорологических станций.

Значительно выше средние скорости ветра, резко уменьшены амплитуды годового хода за счет увеличения скорости ветра на высотах в зимний период. Все это говорит о значительном увеличении потенциальных ветроэнергетических ресурсов верхнего пояса горных территорий.



Для выбора оптимальных режимов работы ВЭУ одних только данных об удельной мощности ветрового потока недостаточно. К числу важнейших характеристик ветрового режима относится средняя непрерывная продолжительность скорости ветра выше (ниже) заданного значения  $\tau_{cp}$  ( $V \geq V_0$ ). В тех случаях, когда информация о скорости ветра ограничена одной лишь средней скоростью  $V_c$ , для расчета  $\tau_{cp}$  ( $V \geq V_0$ ) рекомендуется использовать косвенный метод расчета непрерывной продолжительности скорости ветра выше заданного значения и энергетических затиший [11].

Для высокогорных районов Центрального Алтая средняя годовая повторяемость  $V \geq 3$  м/с на высоте 1000 м составляет около 10 ч, на высоте 2000 м – 13,8 ч, на высоте 3000 м – 16,8 ч.

Строительство ВЭУ на водораздельных участках в отдалении от жилых поселков, производственных помещений, конечно, потребует дополнительных затрат на передачу электрической энергии, увеличатся и ее потери. Но с точки зрения экологической безопасности жизнедеятельности людей, наоборот, требуется относить ВЭУ как можно дальше, так как они создают определенный шум, от которого при нынешних технологиях еще не удается избавиться.

По данным о средних месячных скоростях ветра на водоразделах могут быть рассчитаны составные части ветроэнергетического кадастра. Важны такие характеристики, как повторяемость затиший и их продолжительность, вероятность рабочих скоростей ветра. Нижним пределом рабочей скорости для современных многолопастных тихоходных двигателей с учетом инновационных технологий является 2,5–3 м/с, а для быстроходных 4,5–5 м/с.

Годовая повторяемость скоростей ветра более 3 м/с составляет на водораздельных участках до 80 % и более, а повторяемость скоростей ветра 5 м/с и более составляет до 50 %.

Удельная мощность ветрового потока зависит в большой мере от средних скоростей ветра, а следовательно, от местоположения и абсолютной высоты местности, а также от состояния устойчивости атмосферы. В центральной части Горного Алтая для водораздельных участков выше 1500 м над уровнем моря при скоростях ветра более 4 м/с удельная мощность составляет от 150 до 850 Вт/м<sup>2</sup>. Максимальная мощность может вырабатываться на высотах более 3000 м при обеспеченности скорости ветра более 3 м/с 45–60 %. Этот показатель определен Е.Н. Романовой [13] для Западного Алтая.

Как известно [19], за зону большой энергетики могут быть приняты районы с удельной мощностью более 500 Вт/м<sup>2</sup>, при этом ВЭУ способны выдавать мощность до одного и более МВт, причем работа должна быть обеспечена в течение всего года. Такая зона может быть выделена в центральной части Горного Алтая, начиная примерно с 2200 м.

Зона малой ветроэнергетики – районы с удельной мощностью ветрового потока от 200 до

500 Вт/м<sup>2</sup>. В таких условиях могут эксплуатироваться относительно небольшие ВЭУ мощностью 1–5 кВт. Продолжительность их эффективной работы 50–70 % времени за год. Такие условия на Алтае возникают с высоты около 1500 м.

В данной работе мы не будем останавливаться на технических характеристиках ВЭУ различного типа. С ними можно познакомиться в ряде работ, в том числе в [11, 19]. Отметим, что использование ВЭУ средней и малой мощности может оказаться наиболее рентабельным и способствовать достижению минимальной стоимости единицы производимой энергии.

Результаты расчетов показали, что неперспективными для размещения ВЭУ являются лишь котловины, подветренные склоны и узкие горные долины, ориентированные перпендикулярно господствующему направлению ветра, где средняя годовая скорость ветра менее 3 м/с. Эти районы характеризуются небольшими значениями средней годовой удельной мощности ветрового потока – менее 100 Вт/м<sup>2</sup>, причем даже в периоды усиления ветра (весна, осень) удельная мощность ветрового потока в среднем редко превышает 150 Вт/м<sup>2</sup>.

При оценке ветроэнергетических ресурсов в горных районах Алтая обязательно следует учитывать местные ветры. Для Горного Алтая характерны различные типы местных ветров: горно-долинные ветры, фёны, ледниковые ветры. Характеристики местных ветров на Алтае изложены в целом ряде работ автора [12 и др.] и здесь приводиться не будут. Отметим лишь, что для ветроэнергетики достаточно благоприятными являются фёны. В отдельных районах Горного Алтая имеются долины, отличающиеся большими скоростями ветра в холодный период, скорости ветра в них даже выше, чем в свободной атмосфере на том же уровне. Скорости ветра при фёнах больше, чем средние показатели, и при большой повторяемости фёны могут определять ветроэнергетический потенциал отдельных долин. Максимальная повторяемость фёнов, максимальные скорости ветра при фёнах наблюдаются в холодный период, именно тогда, когда наиболее велика потребность в энергии.

В долине Катунь (меридионально ориентированная ее часть), долине Чулышмана и в других районах наблюдается очень большое количество фёнов. Рельеф в таких долинах выполняет роль ветропроводящих коридоров [19] или воздухопроводов, увеличивает скорость ветра. Из-за местного усиления ветра ВЭУ в таких районах могут успешно работать непосредственно на дне долины.

Менее благоприятными для ветроэнергетики являются горно-долинные ветры. Они на Алтае возникают лишь в тёплый период года. Для ветроэнергетики перспективными являются лишь периоды в суточном ходе, приходящиеся на вторую половину дня (14–18 ч). В период максимального развития долинного ветра скорости в среднем составляют 4–6 м/с. Горно-долинные ветры более интенсивны в открытых долинах.



В соответствии с распределением скорости ветра в тропосфере наибольшими ветроэнергетическими ресурсами отличаются северные и западные районы Горного Алтая. По мере продвижения на юг и восток скорость ветра снижается вследствие роста расчленённости рельефа. Особенно быстро убывают средние значения скорости ветра к югу в холодный период – с октября по апрель, на 0,7–0,8 м/с на 100 км.

В целом можно сказать, что ветроэнергетические ресурсы Алтая на больших высотах весьма значительны и могут эффективно использоваться. Проведенное на независимом материале сравнение расчетных скоростей ветра с фактическими за отдельные месяцы по станции Кара-Тюрек показало, что разности не превышают 0,7 м/с, среднее квадратическое отклонение составляет в среднем 1,2 м/с.

Опыт применения аэроклиматических показателей для оценки ветроэнергетических ресурсов горных стран в условиях недостаточности метеорологической информации показал его перспективность, как в теоретическом, так и в прикладном отношении.

Использование ВИЭ является необходимой частью мероприятий для устойчивого развития общества и охраны окружающей среды. Они позволяют экономить органическое топливо, уменьшать объёмы его перевозок, при этом уменьшается поступление продуктов сгорания в атмосферу. В условиях низкого потенциала самоочищения атмосферы в условиях горных долин и котловин этот фактор имеет важнейшее значение для улучшения экологической обстановки.

Использование ВИЭ будет улучшать условия жизни людей, особенно в условиях разобщённости, будет способствовать сохранению лесов и уменьшению темпов деградации окружающей среды. Их использование может разрешить проблему снабжения электрической энергией большого числа мелких территориально разобщённых потребителей. При этом выровняется обеспеченность энергией районов с разной плотностью населения. Это приведёт к перестройке структуры энергопотребления и стиля жизни.

В современных условиях при отсутствии крупных инвестиций для создания энергетических объектов важным преимуществом ВИЭ является возможность ввода их в эксплуатацию в виде небольших модулей, не требующих больших капитальных вложений. Затем их можно наращивать по мере необходимости.

Перечисленные достоинства ВИЭ способны вызвать интерес к нетрадиционным источникам энергии, усиление научно-исследовательских работ, совершенствование оборудования и снижение его стоимости.

Во многих публикациях ВИЭ характеризуются как абсолютно экологически чистые, не оказывающие негативного влияния на окружающую среду и человека. В связи с этим остановимся на некото-

рых экологических аспектах этой проблемы и на сложностях осуществления планов широкого внедрения таких источников энергии.

Эксперты ООН начиная с 90-х гг. прошлого столетия анализировали состояние дел в этой отрасли энергетики и привлекали большое количество материалов по земному шару [20, 21]. Ими дана оценка экологических последствий использования различных видов нетрадиционных источников энергии. Общее заключение экспертов свидетельствует о том, что существующие представления о ВИЭ как о полностью экологически чистых источниках ошибочны [21]. Экспертиза показала необходимость анализа влияния ВИЭ на окружающую среду еще на стадии проектирования. Необходимо исследовать воздействие установок, связанных не только с выработкой энергии, но и с изготовлением оборудования, в том числе с добычей сырья для создания этого оборудования. Именно на этом этапе во многих случаях могут проявиться наиболее существенные отрицательные экологические воздействия на природу.

Установлено, что ВЭУ вызывают интенсивное акустическое излучение. Например, ветроустановка мощностью 2 МВт с лопастью пропеллера в 60 м (США, штат Каролина) отключается ночью из-за сильного шума [16]. Особую экологическую проблему представляют собой шумовые воздействия ВЭУ мощностью более 250 кВт. Замечено влияние работающих станций на прием теле- и радиопередач, отмечаются помехи для воздушного сообщения, изменяются показания навигационных приборов. ВЭУ травмируют и отпугивают птиц, особенно на перелетных трассах. При создании комплекса ВЭУ ухудшаются условия существования мелких наземных животных, птиц, насекомых. Для них нужны большие площади, и при этом они могут оказать влияние на изменение свойств почвенного покрова. Таким образом, необходим анализ воздействия источников энергии на окружающую среду ещё до стадии проектирования. Это позволит уменьшить неблагоприятные влияния на природу.

#### Заключение

1. В настоящее время вопросам использования возобновляемых источников энергии уделяется серьёзное внимание как во всем мире, так и в Республике Алтай. Эти источники энергии рассматриваются как существенное дополнение к традиционным. В Горном Алтае по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространённости среди ВИЭ наиболее перспективна солнечная радиация. Недостатком ее является низкий уровень солнечной радиации в холодное время года, когда требуется максимальное количество энергии. Гелиоэнергетические ресурсы могут быть дополнены ветроэнергетическими ресурсами. Их максимальные значения в верхнем поясе гор достигают именно в холодный период года.

2. Данные о ветровом режиме, полученные с помощью аэроклиматических показателей, позволили оценить потенциальные ветроэнергетические ресурсы Горного Алтая в верхнем поясе гор. Зона малой энергетики с удельной мощностью от 200 до 500 Вт/м<sup>2</sup> располагается на наветренных склонах и водоразделах выше 1500 м над уровнем моря. Зона большой энергетики с удельной мощностью более 500 Вт/м<sup>2</sup> выделена на наветренных склонах и водораздельных участках начиная с высоты 2200 м. При этом ВЭУ способны выдавать до 1 МВт/м<sup>2</sup>. Неперспективными для размещения ВЭУ являются днища межгорных котловин, подветренные склоны и узкие горные долины, ориентированные перпендикулярно преобладающему направлению ветров. Таким образом, в верхнем поясе гор скорости ветра вполне достаточны, по крайней мере, для создания малой или средней ветроэнергетики, а на больших высотах возможна установка мощных ВЭУ, способных

обеспечить энергией туристические объекты, научные базы, альпинистские лагеря и т. д.

3. Эффективная работа ВЭУ возможна в отдельных горных долинах, где наблюдается большая повторяемость фёнов (южное побережье Телецкого озера, меридионально ориентированная часть долины Катунь, долина р. Чулышман и некоторые другие местности).
4. Использование ВИЭ является необходимой частью мероприятий для дальнейшего социально-экономического развития общества, особенно в условиях низкого потенциала самоочищения атмосферы в горных районах Сибири. Их использование приведет к выравниванию энергообеспеченности районов с разной плотностью населения. Важна возможность постепенного создания энергетических объектов, так как их можно вводить в эксплуатацию в виде отдельных модулей. Всё это постепенно приведёт к перестройке структуры энергопотребления и стиля жизни населения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по климату СССР: в 34 вып., в 5 ч. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – Вып. 20. – Ч. III: Ветер. – 576 с.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 717 с.
3. Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР / под ред. И.Г. Гутермана. – М.: Гидрометеиздат, 1979. – Т. 2. – 400 с.
4. Дробышев А.Д. Энергия солнца и ветра в Краснодарском крае, условия ее утилизации. – СПб.: РГТУ, 2016. – 276 с.
5. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов FM 12 Synop и METAR в системных энергетических исследованиях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 69–88.
6. Носкова Е.В., Обязов В.А. Изменения характеристик ветрового режима на территории Забайкальского края // Метеорология и климатология. – 2016. – № 7. – С. 29–36.
7. Troen I., Petersen E.L. European Wind Atlas. – Roskilde: Denmark-RISO National Laboratory, 1989. – 46 p.
8. Laapas M., Venäläinen A. Homogenization and trend analysis of monthly mean and maximum wind speed time series in Finland, 1959–2015 // International Journal of Climatology. – 2017. – № 37. – P. 4803–4813.
9. Nchaba T., Mpholo M., Lennard C. Long-term austral summer wind speed trends over southern Africa // International Journal of Climatology. – 2017. – № 37. – P. 2850–2862.
10. Dadaser-Celik, Cengi. Wind speed trends over Turkey from 1975 to 2006 // International Journal of Climatology. – 2014. – № 34. – P. 1913–1927.
11. Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов / под ред. О.О. Штаниковой. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 80 с.
12. Севастьянов В.В. Климатические ресурсы Горного Алтая и их прикладное использование. – Томск: Изд-во ТГПУ, 2009. – 252 с.
13. Романова Е.Н. Изменение климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов под влиянием неоднородностей подстилающей поверхности // Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов / под ред. О.О. Штаниковой. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – С. 25–51.
14. Windatlas for Denmark-RISO / E.L. Petersen, I. Troen, S. Prandsen, K. Hedegaard. – Roskilde: Denmark-RISO National Laboratory, 1981. – 229 p.
15. Stewart D.A., Essenwanger O.M. Frequency distribution of wind speed near the surface // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1978. – V. 17. – № 11. – P. 1633–1642.
16. Wieringa J. Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages // Quarterly Journal Royal Meteorological Society. – 1986. – V. 112. – № 473. – P. 867–889.
17. Carrol D.D. The wind resource at Altamont Pass // Sunworld. – 1984. – V. 8. – P. 109–110.
18. Де Рензо Л. Ветроэнергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
19. Сидорович В. Мировая энергетическая революция. Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 208 с.
20. Wind energy around the world // World Wind Energy Association Quarterly Bulletin. – 2015. – V. 1. – 54 p.
21. Балабанов М.С., Бабошкина С.В., Хамитов Р.Н. Экологические аспекты в энергосберегающей политике на этапе создания в России интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 141–152.

Поступила 30.05.2018 г.

#### Информация об авторах

**Севастьянов В.В.**, доктор географических наук, профессор кафедры метеорологии и климатологии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Сапьян Е.С.**, ассистент, старший лаборант, соискатель кафедры краеведения и туризма геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 551.58+551324.63

## WINDPOWER RESOURCES OF CENTRAL REGIONS OF THE ALTAI REPUBLIC

Vladimir V. Sevastyanov<sup>1</sup>,

vvs187@mail.ru

Ekaterina S. Sapian<sup>1</sup>,

Katerinass@vtomske.ru

<sup>1</sup> Tomsk National Research State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** Among the most urgent problems attracting human interest are the problems of energy. They affect directly or indirectly on human society and the environment. The human activity is associated with permanent use of natural energy resources for supplying people with vital functions: heat and light in houses, food, transportation, clothes, etc. At present, in many parts of Siberia there is still no centralized energy service. An important feature of mountainous countries is considerable dispersion of consumers requiring electric and thermal energy, uneven workload during the year and the lack of centralized sources of energy. The main energy sources in mountainous areas are diesel power plants. The cost of the energy produced is very high, particularly in remote areas. Due to the concept of mountain regions development with using renewable energy sources it is possible to solve the energy problem.

**The aim** of the research is to evaluate the possible contribution of wind energy to resource conservation and ecology in mountains regions of the Altai Republic in the frames of intensive development of tourism and recreational activities.

**The objects** of the research are the wind regime in lower troposphere over the southern part of Siberia; orographic conditions and their influence on the wind regime; wind-power potential of mountain areas of the Altai Republic

**The methods** of the research are the upper-air atmosphere sounding; the construction of a mathematical model of the wind velocity field in different altitude levels; assessment and analysis of influence of different topography on wind speed.

**Results.** It is shown that the wind velocity is not enough for wind-power engineering in conditions of intermountain basins and wide valleys. The analysis of air-climatological indicators of wind velocity and the data of high-mountain meteorological stations on the tops and watersheds have shown that in terms of openness of the horizon the wind-power potential is sufficient for effective operation of wind power plants of different capacity. For the watershed areas higher than 1500 m, the power density fluctuates from 150 to 850 W/m<sup>2</sup> that makes it possible to use wind energy plants of low and medium power. The regions with wind power density of more than 500 W/m<sup>2</sup> can be considered as the areas of high energy. Such zones can be marked in the central part of the Altai Mountains, rising from 2200 m.

**Key words:**

Wind, wind velocity, energy, wind energy potential, Altai, wind turbine.

## REFERENCES

1. *Spravochnik po klimatu SSSR* [Reference book on the USSR climate]. Vol. 20. P. III: Wind. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966. 576 p.
2. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR* [Scientific-applied reference book on the USSR climate]. Series 3. Long-term data. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. 717 p.
3. *Novy aeroklimaticheskiy spravochnik svobodnoy atmosfery nad SSSR* [New aeroclimatic reference book of free atmosphere over the USSR]. Vol. 2. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 400 p.
4. Drobyshev A.D. *Energiya solntsa i vetra v Krasnodarskom krae, usloviya ee utilizatsii* [Sun and wind energy in Krasnodar region, conditions of its disposal]. St-Petersburg, RGGMU Publ., 2016. 276 p.
5. Karamov D.N. Formation of initial meteorological massifs using multi-year series FM 12 Synop and METAR in system energy studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88. In Rus.
6. Noskova E.V., Obyazov V.A. Changes in characteristics of wind regime in the Trans-Baikal Territory. *Meteorology and Climatology*, 2016, no. 7, pp. 29–36. In Rus.
7. Troen I., Petersen E.L. *European Wind Atlas*. Roskilde, Denmark-RISO National Laboratory, 1989. 46 p.
8. Laapas M., Venäläinen A. Homogenization and trend analysis of monthly mean and maximum wind speed time series in Finland, 1959–2015. *International Journal of Climatology*, 2017, no. 37, pp. 4803–4813.
9. Nchaba T., Mpholo M., Lennard C. Long-term austral summer wind speed trends over southern Africa. *International Journal of Climatology*, 2017, no. 37, pp. 2850–2862.
10. Dadaser-Celik and Cengi. Wind speed trends over Turkey from 1975 to 2006. *International Journal of Climatology*, 2014, no. 34, pp. 1913–1927.
11. *Rekomendatsii po opredeleniyu klimaticheskikh kharakteristik vetroenergeticheskikh resursov* [Guidelines on determining the climatic characteristics of wind energy resources]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 80 p.
12. Sevastyanov V.V. *Klimaticheskie resursy Gornogo Altaya i ikh prikladnoe ispolzovanie* [Climate resources of the Altai mountains and their applications]. Tomsk, Tomsk State Pedagogical University Publ., 2009. 252 p.
13. Romanova E.N. *Izmenenie klimaticheskikh kharakteristik vetroenergeticheskikh resursov pod vliyaniem neodnorodnostey podstilayushchey poverkhnosti* [Changes in climatic characteristics of wind energy resources under the influence of inhomogeneities of the underlying surface]. *Rekomendatsii po opredeleniyu klimaticheskikh kharakteristik vetroenergeticheskikh resursov* [Guidelines on determining the climatic characteristics of wind energy resources]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. pp. 25–51.
14. Petersen E.L., Troen I., Prandsen S., Hedegaard K. *Windatlas for Denmark-RISO*. Roskilde, Denmark-RISO National Laboratory, 1981. 229 p.
15. Stewart D.A., Essenwanger O.M. Frequency distribution of wind speed near the surface. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1978, vol. 17, no. 11, pp. 1633–1642.

16. Wieringa J. Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 1986, vol. 112, no. 473, pp. 867–889.
17. Carrol D.D. The wind resource at Altamont Pass. *Sunworld*, 1984, vol. 8, pp. 109–110.
18. De Renzo L. *Vetroenergetika* [Wind Energy]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 271 p.
19. Sidorovich V. *Mirovaya energeticheskaya revolyutsiya. Kak vozobnovlyayemye istochniki energii izmenyat nash mir* [Global energy revolution. How renewable energy will change our world]. Moscow, Alpina Publ., 2015. 208 p.
20. Wind energy around the world. *World Wind Energy Association Quarterly Bulletin*, 2015, vol. 1, 54 p.
21. Balabanov M.S., Baboshkina S.V., Khamitov R.N. Electric saving and environmental aspects in policy at the stage of smart grid creation in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 141–152. In Rus.

*Received: 30 May 2018.*

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

**Vladimir V. Sevastyanov**, Dr. Sc., professor, Tomsk National Research State University.

**Ekaterina S. Sapien**, assistant, Tomsk National Research State University.



УДК 519.23

## ВАРИАТИВНЫЙ УЧЕТ ЦЕНООБРАЗУЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ КАДАСТРОВОЙ ОЦЕНКЕ ЗЕМЕЛЬ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГ)

Лепихина Ольга Юрьевна<sup>1</sup>,  
Olgalepikhina1984@gmail.com

Правдина Екатерина Александровна<sup>1</sup>,  
eanes@yandex.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199026, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2.

**Актуальность исследования.** Земля является важнейшим ресурсом, значимость которого в настоящее время очень сложно переоценить. Будучи средством производства, в то же время она выступает в качестве пространственного базиса для жизнедеятельности населения. В современных условиях особенно остро стоит вопрос обеспечения рационального и эффективного использования земель. Для этой цели необходим комплексный анализ и оценка ее экономических, климатических, экологических, геологических и иных характеристик. Одной из разновидностей такой оценки является определение кадастровой стоимости земель. В нашей стране она используется, в первую очередь, для налогообложения, в связи с чем важным становится вопрос о необходимости получения точных и объективных результатов оценки. Современные методики не совершенны, и их применение не всегда обеспечивает корректные и справедливые стоимости земель. Так, к примеру, в них недостаточно внимания уделяется обоснованию исходных ценообразующих факторов, а также корректному выбору их учета при кадастровой оценке. Влияние каждого ценообразующего фактора можно выразить с помощью оценочных показателей разной размерности. Настоящая статья посвящена анализу зависимости кадастровой стоимости земель от выбранного варианта учета факторов на примере земельных участков, расположенных на Васильевском острове города Санкт-Петербурга.

**Цель:** исследование влияния вариативного учета ценообразующих факторов на итоговую стоимость земель населенных пунктов для дальнейшего уточнения и совершенствования методического обеспечения кадастровой оценки земель.

**Методы.** Анализ района местоположения объектов исследования выполнен на основе изучения картографических источников, а также путем визуального осмотра объектов недвижимости. Сбор значений оценочных показателей кадастровой стоимости земельных участков осуществлялся методами пространственного анализа и моделирования данных в геоинформационной системе MapInfo. Выборки рыночных данных о земельных участках производились классическими методами статистического сбора и обработки данных с применением программных приложений пакета MS Office и SPSS. Для построения статистических моделей кадастровой стоимости земель использован корреляционно-регрессионный метод. В целях определения взаимозависимых оценочных показателей при трех рассматриваемых вариантах использован метод «корреляционных плеяд» П.В. Терентьева.

**Результаты.** При проведении кадастровой оценки земель необходимо принимать во внимание наличие вариативности учета факторов с помощью разноразмерных оценочных показателей. Выбор того или иного показателя, характеризующего влияние фактора, должен быть обоснован. Корреляционный анализ показателей выявил разную степень их взаимозависимости, что свидетельствует о том, что они не всегда могут быть взаимозаменяемы при построении статистических моделей. Установлено, что от выбора состава исходных оценочных показателей факторов зависит их структура, состав наиболее значимых показателей, а также рассчитанные кадастровые стоимости земельных участков.

### Ключевые слова:

Земельный участок, природный ресурс, кадастровая оценка, ценообразующий фактор, оценочный показатель, корреляционно-регрессионный метод, метод корреляционных плеяд.

### Введение

Наша страна обладает ценнейшими природными ресурсами, центральное место среди которых занимает земля. Несмотря на обширность распространения по площади, данный ресурс ограничен, в связи с чем актуальной во все времена остается проблема обеспечения рационального его использования. Земля обладает уникальными природными характеристиками, исследование которых необходимо для обоснования наиболее эффективного ее использования в хозяйственной деятельности человека.

Однако землю нужно рассматривать не только как природный ресурс, но и как объект социально-экономических отношений, обладающий определенной оценочной стоимостью.

Одной из разновидностей оценки земель в нашей стране является определение ее кадастровой стоимости. Помимо обозначенных ранее целей,

связанных с обеспечением рационального и эффективного использования земель, указанная оценка используется также для налогообложения.

Тема кадастровой оценки земель и особенно ее методического обеспечения нашла отражение во многих публикациях отечественных исследователей. Так, например, в работах Ю.В. Чернецкой [1], Ю.И. Шабаровой [2], О.А. Трибуц [3] проанализированы основные факторы, оказывающие влияние на стоимость земель в населенных пунктах. Исследования [4, 5] посвящены экспертному подходу к массовой оценке. Работы Т.И. Балтыжаковой [6, 7], П.М. Демидовой и А.М. Рыбкиной [8] освещают особенности применения статистических методов расчета кадастровой стоимости земель. В статьях А.В. Чирухина [9, 10] содержатся требования, предъявляемые к рыночной информации, используемой для проведения кадастровой оценки.

За рубежом тема кадастровой оценки также весьма актуальна. Основные вопросы, волнующие представителей западного научного сообщества, связаны с точностью формируемых статистических моделей массовой оценки земель [11], методами определения значений ценообразующих факторов [12], анализом специфики и возможностей применения массовой и индивидуальной оценки объектов для условий сложившегося рынка недвижимости [13, 14].

При государственной кадастровой оценке возможно возникновение разного рода ошибок и нарушений, обуславливающих необъективную итоговую величину кадастровой стоимости. К сожалению, это приводит к общественной неудовлетворенности результатами оценки и обуславливает возрастающее количество обращений об оспаривании стоимости в суд [15, 16]. Отмеченная ситуация возникает, в том числе, из-за несовершенства методического обеспечения оценочных работ [17–19].

Несмотря на утвержденный единый подход массовой оценки, содержание этапов метода жестко не регламентируются. Так, в части процедуры проведения оценки, связанной с обоснованием исходных ценообразующих факторов, отсутствует обязательный для учета перечень данных факторов, а также метод их учета.

Известно, что на стоимость земель населенных пунктов главным образом оказывают влияние следующие факторы: местоположение, ландшафтно-рекреационной характеристики, уровень развития транспортной и социальной инфраструктуры, инженерное благоустройство территории, экология и другие [20, 21]. В настоящей статье предлагается исследовать зависимость кадастровой стоимости земель от ряда ценообразующих факторов с учетом возможного их вариативного учета при оценке. Авторами выдвигается гипотеза о том, что выбор того или иного варианта учета фактора с помощью разноразмерных показателей окажет влияние на структуру итоговой статистической модели и, следовательно, на рассчитанные стоимости земельных участков.

Настоящая статья является продолжением научных исследований авторов, посвященных особенностям учета ценообразующих факторов при кадастровой оценке земель различных по типу населенных пунктов России [22].

#### Методы и предмет исследования

Предметом исследования в настоящей работе являются факторы, показатели и кадастровая стоимость земельных участков, предназначенных для размещения домов многоэтажной жилой застройки, расположенных в Василеостровском районе города Санкт-Петербург.

Общей теоретической и методологической основой работы явился комплексный подход, включающий анализ нормативно-правовой и научной литературы в области кадастровой оценки земель

населенных пунктов. Для разработки и обоснования положений работы применялись современные экономико-математические и статистические методы: системный анализ, сравнительный анализ, корреляционно-регрессионный анализ, метод корреляционных плеяд. Решение поставленных задач осуществлялось посредством использования современных технических средств и программных продуктов (MapInfo Pro 15.0, Microsoft Excel, SPSS Statistics 22).

#### Результаты исследования

В качестве объектов исследования в Василеостровском районе города Санкт-Петербург было выделено сто тестовых участков указанного ранее вида использования.

Анализ влияния разноразмерных ценообразующих факторов на кадастровую стоимость земель осуществлен на примере факторов, отражающих доступность следующих объектов социальной инфраструктуры:

- 1) школы;
- 2) детские дошкольные учреждения (далее – ДДУ);
- 3) высшие учебные заведения (далее – вузы) и средние специальные учебные учреждения (далее ССУЗы);
- 4) учреждения культуры;
- 5) объекты медицины;
- 6) аптеки;
- 7) объекты индустрии отдыха и развлечений;
- 8) организации сферы обслуживания;
- 9) продуктовые магазины;
- 10) торговые комплексы.

В рамках настоящего исследования предлагается выразить отмеченные выше ценообразующие факторы через систему оценочных показателей разной размерности. Для проверки гипотезы исследования на основании проведенного анализа факторов социальной инфраструктуры выбраны три варианта их учета при кадастровой оценке (табл. 1).

Первый вариант учета фактора социальной инфраструктуры (измерение расстояния от оцениваемого объекта до объекта социальной инфраструктуры) предлагается Методикой государственной кадастровой оценки земель населенных пунктов 2007 г. и заключается в определении значений показателей путем измерения расстояния от оцениваемого объекта до объекта фактора. При этом расстояния измеряются от середины каждого оцениваемого объекта до середины объекта фактора по границам дорог, земельных участков, водоемов.

Второй вариант учета фактора (определение площади оцениваемого объекта, попадающей в зону доступности (влияния) объекта инфраструктуры) предложен в рамках Методики государственной кадастровой оценки земель поселений 2002 г. Он заключается в построении радиусов пешеходной доступности для каждого объекта социальной инфраструктуры и измерении площади оцениваемого объекта, попавшей в данный радиус.

**Таблица 1.** Факторы социальной инфраструктуры и варианты их учета с помощью трех разноразмерных оценочных показателей с указанием типа статистической шкалы

**Table 1.** Factors of social infrastructure and options for their accounting using three different-sized indicators with their statistical scales

Факторы доступности объектов социальной инфраструктуры Factors of social infrastructure	Варианты учета факторов/Options for accounting factors		
	Расстояние от оцениваемого объекта до объекта инфраструктуры Distance from the evaluated object to the infrastructure object	Площадь оцениваемого объекта, попадающая в зону доступности (влияния) объекта инфраструктуры <sup>1</sup> Area of the evaluated object falling into the zone of accessibility (influence) of the infrastructure object <sup>1</sup>	Количество объектов инфраструктуры в радиусе доступности <sup>2</sup> Number of infrastructure objects within the radius of accessibility <sup>2</sup>
Школы/Schools	+ (шкала отношений) + (ratio scale)		
ДДУ/Kindergartens			
ВУЗы и ССУЗы Higher educational institutions and secondary specialized educational institutions			
Учреждения культуры Institutions of culture			
Объекты медицины Institutions of medicine			
Аптеки/Pharmacies			
Объекты индустрии отдыха и развлечений Objects of entertainment industry			
Организации сферы обслуживания Service organizations			
Продуктовые магазины/Food stores			
Торговые комплексы/Shopping malls			

<sup>1</sup>Значение показателя рассчитывается по формуле (1):

$$p = \frac{S_{ob}}{S_l}; \quad (1)$$

$S_{ob}$  – площадь, попадающая в зону влияния объекта инфраструктуры;  $S_l$  – общая площадь земельного участка.

<sup>2</sup>В соответствии с СП 42.13330.2011 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.

<sup>1</sup>Indicators are calculated by the formula (1).  $S_{ob}$  – the area is the evaluated object falling into the zone of accessibility;  $S_l$  is land parcel area.

<sup>2</sup>In accordance with SP 42.13330.2011 Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции для трех методов учета факторов

**Table 2.** Correlation coefficients for three options of accounting the factors

Вариант учета фактора Options of accounting the factors	Учреждения культуры Institutions of culture	Медицинские учреждения Institutions of medicine	Объекты индустрии отдыха и развлечений Objects of entertainment industry	Организации сферы обслуживания Service organizations	Школы Schools	ДДУ Kindergartens	Средние профессиональные и высшие учебные заведения Higher educational institutions and secondary specialized educational institutions	Аптеки Pharmacies	Продуктовые магазины Food stores	Торговые комплексы Shopping malls
1	0,28	0,09	-0,38	0,24	-0,02	0,07	-0,26	0,15	0,10	0,10
2	-0,38	0,29	-0,11	-0,11	0,44	0,24	0,19	-0,19	0,17	0,15
3	-0,05	-0,08	-0,05	-0,04	-0,08	-0,05	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05

Также в рамках данного исследования предлагается еще один метод учета фактора, а именно, – подсчет количества объектов инфраструктуры в радиусе пешеходной доступности. Как и во втором варианте, строятся радиусы доступности для каждого отдельного объекта, и считается количество попаданий оцениваемого объекта в радиусы доступности объектов инфраструктуры.

Таким образом, показана вариативность учета ценообразующих факторов с помощью разноразмерных показателей.

В геоинформационной системе MapInfo Pro 15.0 был создан графический проект, содержащий следующие сведения: местоположение и границы земельных участков, данные об объектах социальной инфраструктуры. Средствами пространствен-

ного анализа и моделирования данных определены значения показателей факторов для трех рассматриваемых вариантов их учета (рис. 1).

По результатам измерений были созданы три группы показателей ценообразующих факторов социальной инфраструктуры. В первой группе – показатели, полученные методом измерения расстояния от оцениваемого объекта до объекта показателя, во второй группе – показатели, полученные методом подсчета количества объектов показателя в радиусе доступности, в третьей группе – показатели, полученные методом измерения площади оцениваемого объекта, попадающей в зону доступности (влияния) объекта показателя.

Информация о рыночной стоимости земельных участков района исследования собрана из следую-







показатели статистической значимости которых принимают значения  $p \leq 0,05(*)$  или  $p \leq 0,01(**)$ .

На схемах корреляционных плеяд приняты следующие обозначения:

- обратная связь между факторами обозначается пунктиром;
- корреляция на уровне статистической значимости 0,01 обозначается одинарной линией;
- корреляция на уровне статистической значимости 0,05 обозначается двойной линией.

Схемы корреляционных плеяд, полученные для трех вариантов учета ценообразующих факторов, представлены на рис. 2.

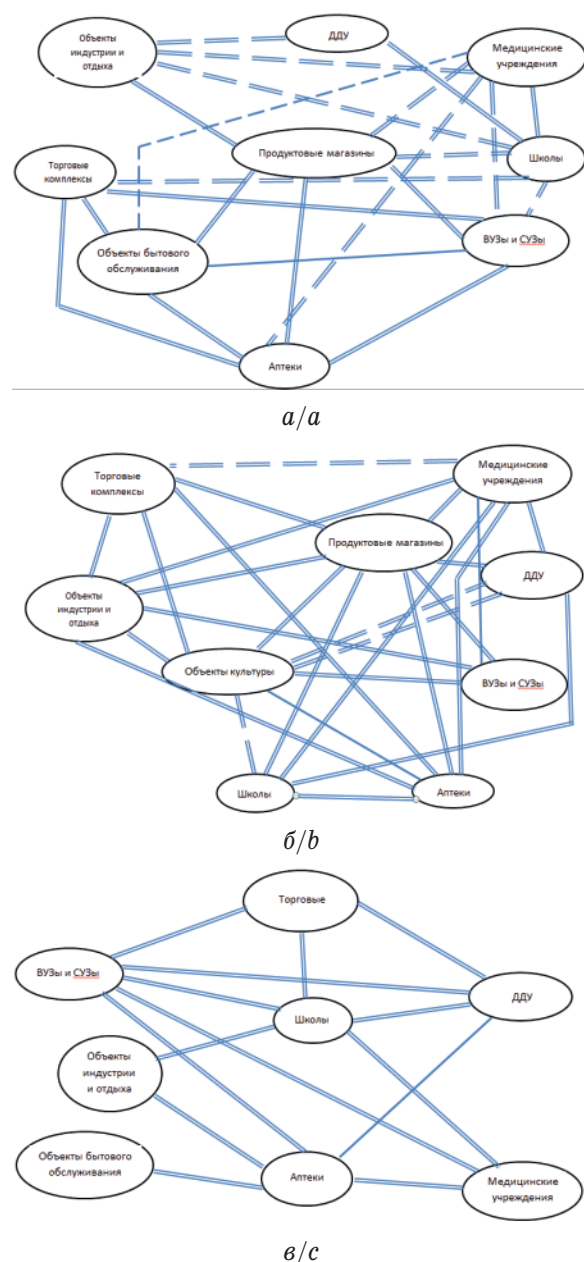


Рис. 2. Схема корреляционных плеяд для первого (а), второго (б) и третьего (в) варианта

Fig. 2. Correlation galaxies for the first (a), second (b) and third (c) option

Схемы корреляционных плеяд визуально демонстрируют различие в зависимостях между показателями при разных вариантах учета ценообразующих факторов. Наибольшее количество зависимостей наблюдается на схеме, построенной по результатам второго метода, и можно сделать вывод о том, что в данном случае возможно сократить количество факторов, оказывающих влияние на итоговую стоимость земельного участка, что упростит структуру статистической модели при расчете кадастровой стоимости земли.

Для дальнейшего доказательства того факта, что выбор того или иного варианта учета факторов окажет влияние на вид итоговой статистической модели и рассчитанные стоимости объектов недвижимости, построим модель кадастровой стоимости для трех вариантов учета этих факторов.

Так как действующие методики кадастровой оценки строго не регламентируют перечень факторов стоимости, отбор наиболее значимых ценообразующих факторов производится на усмотрение оценщика. В данном случае в качестве факторов стоимости для исследуемого вида разрешенного использования выделим в первую очередь рассмотренные выше факторы социальной инфраструктуры, а также дополнительные факторы, учитываемые в современной практике оценки: площадь земельного участка, развитие транспортной инфраструктуры, рекреационная ценность территории.

Построение статистических моделей расчета кадастровой стоимости земельных участков осуществляется в следующей последовательности:

- 1) выбор факторов стоимости для построения моделей;
- 2) построение моделей расчета кадастровой стоимости земельных участков;
- 3) анализ качества статистических моделей.

Для отбора ценообразующих факторов следует определить коэффициенты значимости факторов по формуле (2):

$$R_K = \frac{r_{ky}}{r_{\max}}, \quad (2)$$

где  $r_{ky}$  – коэффициенты частной корреляции;  $r_{\max}$  – максимальный из найденных коэффициентов частной корреляции.

Результаты расчетов для трех рассматриваемых вариантов представлены в табл. 3.

Цель построения моделей расчета кадастровой стоимости земельных участков (модель расчета) состоит в получении статистически значимой и качественной модели расчета.

Под моделью расчета понимается математическая формула, отображающая связь между зависимой переменной и значениями соответствующих факторов стоимости. В качестве зависимой переменной выступает удельный показатель кадастровой стоимости (УПКС).

Для расчета УПКС действующим методическим обеспечением кадастровой оценки земель рассматриваемого вида разрешенного использования регламентирован метод регрессионной модели.

**Таблица 3.** Выбор факторов стоимости для трех вариантов учета на основе анализа значимости коэффициентов корреляции

**Table 3.** Choice of factors for three options by analysis of the correlation coefficients statistical importance

Фактор/Factor	Ф1/F1	Ф2/F2	Ф3/F3	Ф4/F4	Ф5/F5	Ф6/F6	Ф7/F7	Ф8/F8	Ф9/F9	Ф10/F10	Ф11/F11	Ф12/F12	Ф13/F13
Первый вариант учета/First option of accounting													
$r_{hy}$	-0,1	0,0	0,3	0,1	-0,4	0,2	-0,0	0,1	-0,3	0,2	0,1	0,1	0,8
$R_k$	-0,1	0,0	0,4	0,1	-0,5	0,3	-0,0	0,1	-0,4	0,2	0,1	0,1	1
Заключение о значимости Conclusion on significance	нет/no	нет/no	да/yes	нет/no	да/yes	да/yes	нет/no	нет/no	да/yes	нет/no	нет/no	нет/no	да/yes
Второй вариант учета/Second option of accounting													
$r_{hy}$	-0,3	0,4	-0,4	0,3	-0,1	-0,1	0,4	0,2	0,2	-0,2	0,2	0,2	0,8
$R_k$	-0,4	0,5	-0,5	0,4	-0,1	-0,1	0,6	0,3	0,2	-0,2	0,2	0,2	1
Заключение о значимости Conclusion on significance	да/yes	да/yes	да/yes	да/yes	нет/no	нет/no	да/yes	да/yes	нет/no	нет/no	нет/no	нет/no	да/yes
Третий вариант учета/Third option of accounting													
$r_{hy}$	-0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,1	0,8
$R_k$	-0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	1
Заключение о значимости Conclusion on significance	нет/no												да/yes

Ф1 – развитие транспортной инфраструктуры; Ф2 – рекреационная ценность территории; Ф3 – учреждения культуры; Ф4 – медицинские учреждения; Ф5 – объекты индустрии отдыха и развлечений; Ф6 – организации сферы обслуживания; Ф7 – школы; Ф8 – ДДУ; Ф9 – вузы и ССУЗы; Ф10 – аптеки; Ф11 – продуктовые магазины; Ф12 – торговые комплексы; Ф13 – площадь участка.

F1 – development of transport infrastructure; F2 – recreational value of the territory; F3 – institutions of culture; F4 – institutions of medicine; F5 – objects of entertainment industry; F6 – service organizations; F7 – schools; F8 – kindergartens; F9 – higher educational institutions and secondary specialized educational institutions; F10 – pharmacies; F11 – food stores; F12 – shopping malls; F13 – land parcel area.

Для построения модели необходима исходная рыночная информация о земельных участках, объем которой должен превосходить количество факторов стоимости более чем в шесть раз.

Таким образом, необходимо иметь рыночную информацию в следующем объеме:

- для первого варианта учета факторов – не менее чем о 36 рыночных сделках;
- для второго варианта учета факторов – не менее чем о 48 рыночных сделках;
- для третьего варианта учета факторов – не менее чем о 12 рыночных сделках.

Для построения моделей воспользуемся методами регрессионной статистики.

Уравнение линейной (аддитивной) модели имеет вид (3):

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_n \cdot x_n, \quad (3)$$

где  $Y$  – зависимая переменная (рыночная стоимость 1 м<sup>2</sup> земли или стоимость земельных участков);  $x_1, \dots, x_n$  – факторы стоимости земельных участков;  $a_0, a_1, \dots, a_n$  – коэффициенты модели.

Для первого варианта учета факторов регрессионный анализ дал следующие результаты:  $R$ -квадрат равен 0,74 – высокая точность аппроксимации;  $p$ -значение < 0,05 – модель значима; значение свободного члена ( $Y$ -пересечение) 25426,088.

Уравнение для расчета кадастровой стоимости имеет вид (4):

$$Y = 25426,09 - 0,29 \cdot x_1 + 4,55 \cdot x_2 + 23,24 \cdot x_3 + 7,82 \cdot x_4 - 12,72 \cdot x_5, \quad (4)$$

где  $x_1, \dots, x_5$  – значения факторов стоимости земельных участков;

Для третьего варианта:  $R$ -квадрат равен 0,74 – средняя точность аппроксимации; получен-

ное  $p$ -значение < 0,05 – модель значима; значение свободного члена ( $Y$ -пересечение) 31205,2156.

Уравнение для расчета кадастровой стоимости имеет вид (5):

$$Y = 31205,2 - 0,42 \cdot x_1, \quad (5)$$

где  $x_1$  – значение фактора стоимости земельных участков.

Модель, полученная по второму варианту учета факторов, оказалась незначима, в связи с чем в дальнейшем данный вариант рассмотрен не был.

Также для проверки статистической значимости модели используется критерий Фишера (6):

$$F = \frac{(N - m - 1)R^2}{m(1 - R^2)}, \quad (6)$$

где  $N$  – количество объектов в выборке;  $m$  – количество факторов стоимости, используемых в построении модели;  $R^2$  – коэффициент детерминации построенной модели.

Модель считается статистически значимой, если найденное значение  $F$ -критерия превышает пороговое значение  $F_{\text{табл}}$  при заданном уровне значимости 0,05.

Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Для оценки качества модели дополнительно рассчитывается средняя относительная погрешность оценки и среднеквадратическая ошибка оценки.

Средняя относительная погрешность оценки определяется по формуле (7):

$$\Delta = \frac{100 \%}{n} \cdot \sum \frac{|Y_i - Y_i|}{Y_i}, \quad (7)$$

где  $Y_i$  – реальное значение рыночной стоимости;  $Y_i$  – модельное значение рыночной стоимости;  $n$  – объем выборки.

**Таблица 4.** Проверка статистической значимости модели для двух вариантов

**Table 4.** Checking statistical importance of the model for two options

Вариант Option	Модель Model	Коэффициент детерминации $R^2$ <i>R-squared</i>	Критерий Фишера F-test		Статистическая значимость модели Statistical significance of the model
			расчетный calculated	табличный standard	
1	Регрессионная линейная	0,73	53,23	3,86	да/yes
3	Linear regression	0,74	186,88	3,86	

Среднеквадратическая ошибка оценки (стандартное отклонение), характеризующая разброс модельных оценок относительно существующих значений рыночных цен 1 м<sup>2</sup>, рассчитана по формуле (8):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N - m - 1}}, \quad (8)$$

где  $N$  – объем выборки;  $m$  – количество факторов стоимости.

Критериями отбора модели являются следующие показатели:

- минимальная средняя относительная погрешность;
- максимальный коэффициент детерминации;
- минимальная среднеквадратическая ошибка.

По показателям «средняя относительная погрешность оценки», «коэффициент детерминации», «среднеквадратическая ошибка оценки» обе модели признаны статистически значимыми.

После выбора модели расчета кадастровой стоимости необходимо экстраполировать ее на все оцениваемые земельные участки. Модельная рыночная стоимость, получаемая в результате расчета, будет являться удельными показателями кадастровой стоимости оцениваемых земельных участков.

Кадастровая стоимость определяется путем перемножения удельного показателя кадастровой стоимости на площадь земельного участка.

Итоговые значения кадастровых стоимостей земельных участков для двух вариантов учета факторов показали, что разница средних значений полученных кадастровых стоимостей составляет 15 %. Этот факт подтверждает гипотезу о том, что от выбора метода учета ценообразующих факторов зависят итоговые значения кадастровых стоимостей.

### Обсуждение

В работе затронута актуальная проблема одного из этапов проведения государственной кадастровой оценки земель населенных пунктов – отбор и учет наиболее значимых ценообразующих факторов.

В рамках исследования проведен анализ зависимости кадастровой стоимости земель населенных пунктов от ценообразующих факторов, влия-

ние каждого из которых было выражено через систему разноразмерных оценочных показателей. В результате выявлены основные факторы, оказывающие влияние на величину кадастровой стоимости земель, а именно: площадь участка, доступность учреждений культуры, объектов индустрии отдыха и развлечений, организаций сферы обслуживания, высших учебных и средних специальных учебных заведений, уровень развития транспортной инфраструктуры. Доказана возможность вариативного учета влияния факторов на стоимость земель с помощью системы разноразмерных оценочных показателей.

Такой инструмент управления, как оценка земель, должен рассматриваться как система, способная адаптироваться к постоянным изменениям состояния качества окружающей среды, степени развития инженерной и производственной инфраструктуры, социально-бытового обслуживания населения, состояния инженерно-геологических условий и подверженности территории разрушительным природным и техногенным воздействиям. Одним из вариантов реализации быстрого учета вышеописанных изменений, информация о которых необходима при проведении кадастровой оценки, является создание баз данных, в которых в том числе будет содержаться постоянно обновляемая информация о факторах и показателях кадастровой стоимости для каждого отдельного района города. Создание подобной базы данных на этапе разработки потребует определенного количества затрат труда и времени, однако в дальнейшем позволит ускорить процесс и повысить качество кадастровой оценки недвижимости. Данный метод способен повысить точность результатов оценки объектов недвижимости в долгосрочной перспективе.

В заключение нужно отметить, что для повышения точности результатов кадастровой оценки необходимо совершенствование существующих методов кадастровой оценки недвижимости. Результаты данного исследования могут быть использованы при разработке методического обеспечения массовой кадастровой оценки земель населенных пунктов России.

### Заключение

В настоящей статье проведено исследование влияния варианта учета ценообразующих факторов социальной инфраструктуры на примере земельных участков Василеостровского района города Санкт-Петербург.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При проведении государственной кадастровой оценки земель населенных пунктов необходимо учитывать существование вариантов учета ценообразующих факторов. Вариативный учет факторов при оценке одного и того же объекта недвижимости приводит к получению различных величин кадастровой стоимости объектов,



поэтому выбор того или иного варианта учета факторов должен быть обоснован.

2. Корреляционный анализ оценочных показателей факторов выявил различную степень их зависимости с рыночными стоимостями объектов недвижимости, что говорит о том, что они не могут быть взаимозаменяемы при построении статистических моделей кадастровой стоимости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернецкая Ю.В. Кадастровая оценка земельных участков индивидуальной жилой застройки населенных пунктов с учетом обременений и ограничений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2014. – 20 с.
2. Шабаетова Ю.И. Кадастровая оценка земель индивидуальной жилой застройки с учетом дифференциации городской территории по престижности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2015. – 20 с.
3. Трибуц О.А. Кадастровая оценка земель жилой застройки с учетом влияния разломов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2012. – 20 с.
4. Шабаетова Ю.И. Групповая экспертная оценка значимости факторов на основе использования метода парного сравнения // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4. – С. 47–53.
5. Faris AL-Oqla D.D., Hayajneh M. Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in MultiCriteria Analysis of the Selection of Cranes // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2010. – № 5. – P. 567–578.
6. Балтыжакова Т.И. Кадастровая оценка земель малых и средних населенных пунктов с учетом взаимной зависимости ценообразующих факторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2015. – 20 с.
7. Балтыжакова Т.И. Выявление скрытых факторов кадастровой оценки земель населенных пунктов методом главных компонент // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1–1. – С. 20–25.
8. Демидова П.М., Рыбкина А.М. Детерминистические методы интерполяции и возможность их применения для целей кадастровой оценки земель малоэтажной жилой застройки населенных пунктов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 11–5 (53). – С. 70–72.
9. Чирухин А.В. Современные требования к научно-экономическому обоснованию кадастровой оценки // Научное обеспечение реализации государственных программ АПК и сельских территорий: Материалы международной научно-практической конференции. – Курган: Курганская ГСХА, 2017. – С. 161–164.
10. Рубинштейн Е.Д., Осипенко Е.Д. Анализ рынка недвижимости и его прогнозирование. Теория и практика общественного развития. – 2015. – № 12. – С. 140–143.
11. Bauman V. Cadastral Valuation Models // Economic Science for Rural Development: proceedings of international scientific conference. – Craiova, Romania, 2010. – № 22. – P. 68–75.
12. Bauman V. Evaluation of indicators of cadastral assessment // Civil Engineering'13: Proc. 4<sup>th</sup> International Conference. P. I. Land Management and Geodesy. – Jelgava, Latvia University of Agriculture, 2013. – P. 299–304.
13. Bagdonavicius A., Deveikis S. Individual and Mass Valuation – Present and Future // Pharaohs to Geoinformatics: Proc. of FIG Working Week 2005 and GSDI-8. – Cairo, Egypt, April 16–21, 2005. – P. 1–5.
14. Bauman V. Content and application possibilities of evaluation methods in real property cadastral assessment in Latvia // Baltic Surveying'11. Proc. of International Scientific Conference. – Jelgava, LUA, 2011. – P. 43–50.
15. Горшков С.И. Оспаривание результатов кадастровой оценки объектов недвижимости // Научные труды Северо-западного института управления. – 2016. – № 3 (20). – Т. 6. – С. 246–254.
16. Лыжко Е.А. Кадастровая оценка объектов недвижимости и процедура ее оспаривания // Инновационная деятельность: теория и практика. – 2016. – № 7 (3). – С. 3–7.
17. Лепихина О.Ю., Гореликов В.Г. Проблемы кадастровой оценки земель жилой застройки малых и средних городов России // Записки Горного института. – 2013. № 210. – С. 175–181.
18. Якупова Н.М., Галимова Л.И. Проблемы оценки кадастровой стоимости земельных участков // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 7 (Ч. 2). – С. 417–422.
19. Ковязин В.Ф., Романчиков А.Ю. Проблемы кадастровой оценки лесных земель с учетом инфраструктуры лесного фонда // Записки Горного института. – 2018. – № 229. – С. 98–104.
20. Adrian Savu, Daniela Raboj. Cadastral Documentation in Real Valuation // The Valuation Journal. – 2014. – V. 9. – Iss. 1. – P. 54–71.
21. Giluca A., Parsova V., Zgirsks M. Use of analytic hierarchy process in evaluation of land survey projects case in Latvia // Baltic Surveying'11. Proc. of International Scientific Conference. – Jelgava, LUA, 2011. – P. 78–83.
22. Pravdina E.A., Lepikhina O.J. Influence of pricing factor dimension on the cadastral cost of urban land plot // Journal of environmental management and tourism. – 2016. – V. 7. – Iss. 3 (15). – P. 383–393.

Поступила 11.05.2018 г.

#### Информация об авторах

**Лепихина О.Ю.**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

**Правдина Е.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела Санкт-Петербургского горного университета.



UDC 519.23

## VARIABLE ACCOUNTING OF PRICING FACTORS AT LAND PARCELS CADASTRAL VALUATION (ON THE EXAMPLE OF SAINT-PETERSBURG)

Olga Yu. Lepikhina<sup>1</sup>,  
Olgalepikhina1984@gmail.com

Ekaterina A. Pravdina<sup>1</sup>,  
eanes@yandex.ru

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University,  
2, 21st str. V.O., Saint-Petersburg, 199026, Russia.

**The relevance.** The earth is the most valuable resource, the importance of which is now very difficult to overestimate. Being a means of production, at the same time, it is as a spatial basis for population activity. In today's environment, the issue of ensuring rational and efficient use of land is particularly acute. For this purpose complex analysis and estimation of its economic, climatic, ecological, geological and other characteristics is necessary. One of the types of such assessment is definition of cadastral value of land. In our country it is used mainly for taxation, therefore, it is important to provide accurate and objective results of the assessment. Modern techniques are not perfect, and their use does not always provide the correct and fair value of land. For example, not enough attention is paid for choosing source factors and justification of variant of their accounting at cadastral valuation. Each of these factors may be accounted by some indicators with different dimensions. The article is devoted to the analysis of dependence between chosen indicators and cadastral value on the example of land parcels which are located on the Vasilevsky Island in Saint-Petersburg.

**The main aim** of research is to study the influence of variable accounting of pricing factors on the total cost of urban lands for further specification and improvement of land parcels cadastral valuation methods.

**Methods.** The analysis of objects location was carried out by studying the cartographical sources as well as by visual survey of real estate objects. The values of estimated indicators of land parcels were gathered by the methods of spatial analysis and modeling in geographic information system MapInfo. The land parcels market data were selected by the methods of statistical collecting and data processing with application of MS Office software and SPSS. The authors used the correlation method and regression analysis for statistical models creation and the method of «correlation galaxies» by P.V. Terentev for defining the interdependent estimated indicators at three considered options.

**Results.** When carrying out the cadastral valuation of lands it is necessary to consider the existence of variability of factors accounting by some estimated indicators with different dimensions. Choosing this or that indicator characterizing the influence of a factor should be justified properly. The correlation analysis of indicators revealed different degree of their interdependence that demonstrates that they can be not always interchangeable at creation of statistical models. Structure of the most significant indicators such as the calculated cadastral values depends on the choice of structure of initial estimated indicators of factors.

### Key words:

Land plot, natural resource, cadastral valuation, pricing factor, estimated indicator, real estate market, correlation and regression method, method of correlation galaxies.

### REFERENCES

1. Chernetskaya Yu.V. *Kadastrrovaya otsenka zemelnykh uchastkov individualnoy zhiloy zastroyki gorodskikh naselennykh punktov s uchetom obremeneniya i ogranicheniy*. Avtoreferat Kand. Nauk [Cadastral assessment of individual housing lands of cities accounting restrictions. Cand. Diss. Abstract]. Saint-Petersburg, 2014. 20 p.
2. Shabayeva Yu.I. *Kadastrrovaya otsenka zemel individualnoy zhiloy zastroyki s uchetom differentsiatsii gorodskoy territorii po prestizhnosti*. Avtoreferat Kand. Nauk [Cadastral assessment of individual housing lands of cities accounting urban area zoning by the criteria of the prestige value. Cand. Diss. Abstract]. Saint-Petersburg, 2015. 20 p.
3. Tributs O.A. *Kadastrrovaya otsenka zemel zhiloy zastroyki naselennykh punktov s uchetom vliyaniya razlomov*. Avtoreferat Kand. Nauk. [Cadastral assessment of residential development lands of cities accounting influence of breaks. Cand. Diss. Abstract]. Saint-Petersburg, 2012. 20 p.
4. Shabayeva Yu.I. Group expert assessment of the importance of factors on the basis of the pair comparison method. *Engineering bulletin of Don*, 2014, no. 4, pp. 47–53. In Rus.
5. Faris AL-Oqla D.D., Hayajneh M. Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in MultiCriteria Analysis of the Selection of Cranes. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2010, no. 5, pp. 567–578.
6. Baltyzhakova T.I. *Kadastrrovaya otsenka zemel malykh i srednikh naselennykh punktov s uchetom vzaimnoy zavisimosti tsenoobrazuyushchikh faktorov*. Avtoreferat Kand. nauk [Cadastral assessment of small and average settlement lands accounting dependence of pricing factors. Cand. Diss. Abstract]. Saint-Petersburg, 2015. 20 p.
7. Baltyzhakova T.I. Identification of the hidden factors of urban lands cadastral value by the method of main components. *Engineering bulletin of Don*, 2015, no. 1–1, pp. 20–25. In Rus.
8. Demidova P.M., Rybkina A.M. Deterministic methods of interpolation and possibility of their application for cadastral valuation of low residential urban lands. *International research journal*, 2016, no. 11–5 (53), pp. 70–72. In Rus.
9. Chirukhin A.V. *Sovremennyye trebovaniya k nauchno-ekonomicheskomu obosnovaniyu kadastrrovoy otsenki* [Modern requirements to scientific and economical justification of cadastral valuation]. *Nauchnoe obespechenie realizatsii gosudarstvennykh program APK i selskikh territoriy. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific support of state programs of farming sector and rural regions. Materials of international scientific conference]. Kurgan, 2017. pp. 161–164.
10. Rubinshteyn E.D., Osipenko N.S. *Analiz rynka nedvizhimosti i ego prognozirovaniye* [The real estate market analysis and forecasting]. *Theory and practice of public development*, 2015, no. 12, pp. 140–143.

11. Bauman V. Cadastral Valuation Models. *Economic Science for Rural Development: proceedings of international scientific conference*, Craiova, Romania, 2010, no. 22, pp. 68–75.
12. Bauman V. Evaluation of indicators of cadastral assessment. *Proc. 4<sup>th</sup> International Conference Civil Engineering'13. P. I. Land Management and Geodesy*, Latvia University of Agriculture, 2013. pp. 299–304.
13. Bagdonavicius A., Deveikis S. Individual and Mass Valuation – Present and Future. *Pharaohs to Geoinformatics. Proc. of FIG Working Week 2005 and GSDI-8*. Cairo, Egypt, April 16–21. 2005. pp. 1–5.
14. Bauman V. Content and application possibilities of evaluation methods in real property cadastral assessment in Latvia. *Baltic Surveying'11. Proc. of International Scientific Conference*. Jelgava, LUA, 2011. pp. 43–50.
15. Gorshkov S.I. Osparivanje rezultatov kadaastrovoy otsenki obek-tov nedvizhimosti [Contesting of real estate cadastral assessment]. *Scientific materials of the Northwest institute of management*, 2015, vol. 6, no. 3 (20), pp. 246–254.
16. Lyzhko E.A. Cadastral assessment of real estate and its contesting. *Innovative activity: theory and practice*, 2016, no. 7 (3), pp. 3–7. In Rus.
17. Lepikhina O.Yu., Gorelikov V.G. Problems of state cadastral assessment of residential lands of small and average towns in Russia. *Journal of Mining Institute*, 2013, no. 210, pp. 175–181. In Rus.
18. Yakupova N.M., Galimova L.I. Problems of cadastral valuation of land parcels. *Fundamental inquiries*, 2016, no. 7 (P. 2), pp. 417–422. In Rus.
19. Kovyazin V.F., Romanchikov A.Yu. Problems of cadastral assessment of forestland accounting the infrastructure of forest fund. *Journal of Mining Institute*, 2018, no. 229, pp. 98–104. In Rus.
20. Adrian Savu, Daniela Raboj. Cadastral Documentation in Real Valuation. *The Valuation Journal*, 2014, vol. 9, Iss. 1, pp. 54–71.
21. Giluca A., Parsova V., Zgirsks M. Use of analytic hierarchy process in evaluation of land survey projects case in Latvia. *Baltic Surveying'11. Proc. of International Scientific Conference*. Jelgava, LUA, 2011. pp. 78–83.
22. Pravdina E.A., Lepikhina O.J. Influence of pricing factor dimension on the cadastral cost of urban land plot. *Journal of environmental management and tourism*, 2016, vol. 7, Iss. 3 (15), pp. 383–393.

Received: 11 May 2018.

#### Information about the authors

**Olga Yu. Lepikhina**, Cand. Sc., associate professor, Saint-Petersburg Mining University.

**Ekaterina A. Pravdina**, Cand. Sc., associate professor, Saint-Petersburg Mining University.

УДК 622.276

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ ГАЗА ИЗ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ КОЛЛЕКТОРОВ В УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОРСКОГО ШЕЛЬФА

Смурьгин Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
vsmurygin@gas.crimea.ru

Рабаев Руслан Уралович<sup>2</sup>,  
rabaevru@rusoil.net

Блинов Сергей Алексеевич<sup>3</sup>,  
blsergal@yandex.ru

Бакишев Тимур Бегайдарович<sup>3</sup>,  
t.bakishev@krezol.ru

Султанов Шамиль Ханифович<sup>2</sup>,  
ssultanov@mail.ru

<sup>1</sup> ГУП РК «Черноморнефтегаз»,  
Россия, 295000, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Кирова, 52.

<sup>2</sup> Уфимского государственного нефтяного технического университета,  
Россия, 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

<sup>3</sup> ООО «Крезол-НефтеСервис»,  
Россия, 450027, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Трамвайная, 2/4.

**Актуальность** исследования заключается в том, что в настоящее время проблема поддержания уровней добычи углеводородов характеризуется, в том числе, недостаточной эффективностью существующих методов стимуляции и восстановления проницаемости продуктивного пласта вследствие малого охвата продуктивного пласта реагентами, как по толщине, так и по глубине проникновения, а также низкой эффективностью освоения. В этих условиях большое значение приобретают эффективные методы освоения скважин, а также методы интенсификации добычи, которые позволяют реанимировать и улучшить фильтрационные характеристики коллектора в призабойной зоне пласта. Особенно это актуально для месторождений Черноморского шельфа, где ряд эксплуатационных объектов представлен пластами-коллекторами терригенного и карбонатного состава, разрабатываемыми одновременно и где встречаются разрезы скважин с высокой неоднородностью геологических параметров.

**Цель:** предложить и обосновать технологию интенсификации добычи газа для скважин, разрабатывающих газонасыщенные пласты с различным типом коллектора, а также обосновать применение предложенного состава для обработки скважины и технологии обработки скважин.

**Объект:** скважина № 1 газоконденсатного месторождения Черноморского шельфа.

**Методы.** С целью качественного обоснования технологии воздействия на призабойную зону пласта выполнен геолого-промысловый анализ разработки, на керновом материале проведены лабораторные исследования по подбору оптимального кислотного состава.

**Результаты.** Обоснована технология интенсификации добычи газа для скважин, разрабатывающих газонасыщенные пласты с различным типом коллектора, в условиях месторождений морского шельфа. Оценена эффективность применения кислотного состава на основе 24 % соляной кислоты, и предложена технология проведения обработки скважины, включающая последовательную закачку кислотного раствора и отклонителя.

### Ключевые слова:

Газовое месторождение морского шельфа, эффективные методы освоения скважин, технология интенсификации добычи газа, воздействие соляной кислоты на пласт, восстановление проницаемости пласта, обработка призабойной зоны пласта.

### Введение

В настоящее время проблема поддержания уровней добычи углеводородов характеризуется, в том числе, недостаточной эффективностью существующих методов стимуляции и восстановления проницаемости продуктивного пласта вследствие малого охвата продуктивного пласта реагентами, как по толщине, так и по глубине проникновения, а также низкой эффективностью освоения. В этих

условиях большое значение приобретают эффективные методы освоения скважин, а также методы интенсификации добычи, которые позволяют реанимировать и улучшить фильтрационные характеристики коллектора в призабойной зоне пласта (ПЗП). Наряду с широко используемыми химическими методами интенсификации все чаще применяются и другие методы воздействия, обеспечивающие комплексное действие при проведении об-

работок скважин для повышения эффективности и сокращения затраченного времени закачки интенсифицирующих реагентов и вывода скважины на режим. При использовании подобных технологий и методов проявляется комплекс эффектов и явлений, в совокупности способствующих повышению эффективности обработки скважин [1–9].

Современные технологии и методы должны быть направлены на увеличение поверхности контакта реагента с породой, снижение количества необработанного порового пространства и ускорение массообменных процессов в пласте при дополнительном подключении «в работу» ранее не дренируемые зоны. Благодаря этому возрастает доля поровых каналов для фильтрации в них жидкости, и, соответственно, повышается эффективность химического воздействия [5–9, 10–17]. Разработка технологии интенсификации добычи газа и последующая ее реализация в условиях морского шельфа и, соответственно, технические возможности морских платформ требуют проведения геолого-промысловых и лабораторных исследований. Особенно это актуально для месторождений Черноморского шельфа, где ряд эксплуатационных объектов представлен пластами-коллекторами терригенного и карбонатного состава, разрабатываемыми одновременно.

#### Об объекте исследований

Снижение эффективности эксплуатации скважин также наблюдается на ряде газовых и газоконденсатных месторождений Черноморского шельфа. На примере скважины № 1 газоконденсатного месторождения предложена технология обработки призабойной зоны скважины и обоснован химический состав для одновременного воздействия на продуктивные пласты, представленные

карбонатным и терригенным коллектором. Скважиной № 1 одновременно разрабатывается два продуктивных пласта в верхне- и нижнепалеоценовых отложениях. Изучение и обобщение геологической информации о породах продуктивной части разреза скважины позволило отметить, что объект исследования характеризуется достаточно высокой неоднородностью. Литологический разрез скважины № 1 верхнего палеоцена представлен чередованием песчаника, глинистого известняка и мергеля, а нижнего палеоцена – переслаиванием алевритистого и глинистого известняка. Основная геолого-геофизическая информация по объекту исследования представлена в табл. 1.

Основной причиной снижения продуктивности скважины № 1 послужило то, что при приобщении в разработку залежи в верхнем палеоцене для ликвидации поглощения в нижнем палеоцене в скважину № 1 проводилась закачка кольматирующих пачек. Анализ результатов проведенного геолого-технического мероприятия (ГТМ) позволил предположить, что после ГТМ продуктивные пласты нижнего палеоцена разрабатываются неэффективно.

#### Первый этап работ

Первым этапом выполненных работ являлся подбор кислотного состава, одинаково эффективно «работающего» как в продуктивных пластах верхнепалеоценового комплекса пород, так и в пластах нижнепалеоценового комплекса. Для достижения этой цели протестированы образцы кернового материала скважины газоконденсатного месторождения [18–20]:

- I – алеврит верхнепалеоценового возраста;
- II – известняк нижнепалеоценового возраста;

**Таблица 1.** Геолого-геофизическая характеристика продуктивных пластов верхнего и нижнего палеоцена по данным обработки результатов ГИС

**Table 1.** Geological and geophysical characteristics of the productive layers of the Upper and Lower Paleocene according to the well logging results processing data

Интервал, м Interval, m	Возраст Age	Литология Lithology	Тип коллектора Type of collector	Толщина, м Thickness, m	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м Specific electrical resistance, Ohm m			Пористость по АК Porosity by AL	Глинистость по ГК (K <sub>гк</sub> ) Clayiness in GRL (Kg)	Насыщение (K <sub>нат</sub> ) Saturation (K <sub>иг</sub> )	Характер насыщения Nature of saturation
					БК LL	ИК PL	принятое accepted				
1665,9–1668,3	верхний палеоцен upper paleocene	терригенный terrigenous	поровый porches	2,4	1,6	2,4	2,4	25,0	25,4	52,1	заглинизированный, газоносный clayed gas-bearing
1668,3–1709,0				40,7	2,4	4,4	4,4	27,0	12-18	69,1	газоносный gas-bearing
1753,0–1761,4	нижний палеоцен lower paleocene	терригенно-карбонатный terrigenous-carbonate	смешанный mixed	8,4	4-9	4-7	4-7	15,1	11,7	50-63	неоднородный, газоносный heterogeneous, gas-bearing
1763,1–1764,8				1,7	14,7	19,8	19,8	9,9	–	66,8	газоносный gas-bearing
1764,8–1769,6				4,8	14,4	17,2	17,2	12,8	12,4	76,2	
1769,6–1775,5				5,9	7,8	8,5	8,5	12,1	11,4	60,2	



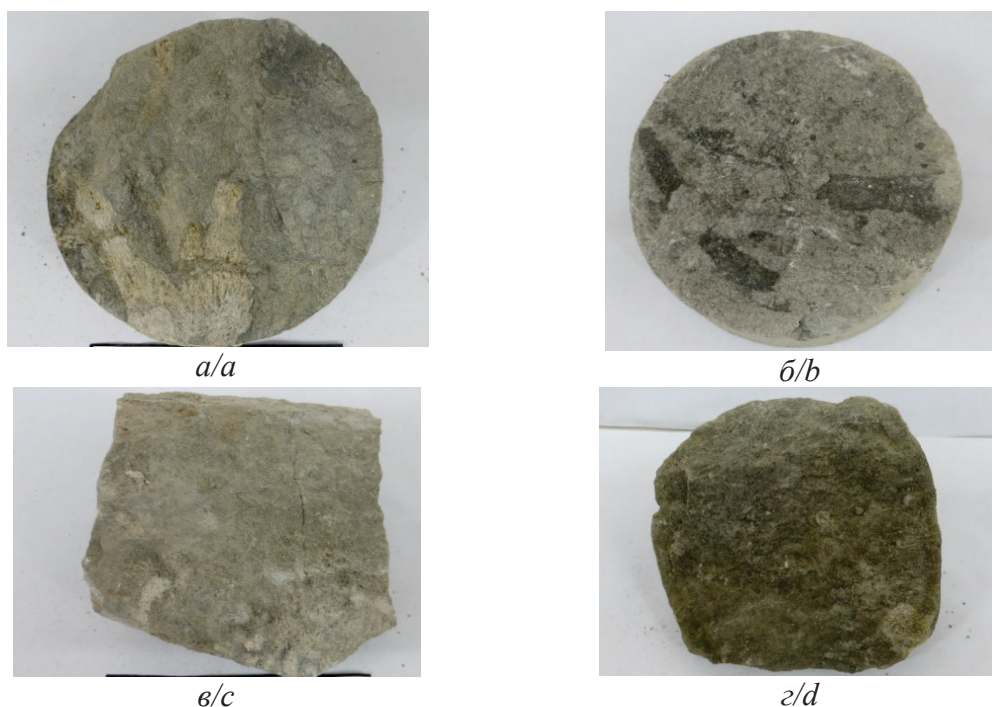


Рис. 1. Внешний вид образцов кернового материала скважины № 1: а) интервал 1452,25–1457,75, вынос керна 5,5 м, верхний палеоцен, алевролит; б) интервал 1528,5–1535,0, вынос керна 6,0 м, нижний палеоцен, известняк; в) интервал 1526,7–1527,5, вынос керна 3,5 м, нижний палеоцен, известняк; г) интервал 1457,75–1463,25, вынос керна 5,5 м, верхний палеоцен, алевролитистый песчаник

Fig. 1. Appearance of samples of core material of well no. 1: a) interval 1452,25–1457,75, core discharge 5,5 m, Upper Paleocene, siltstone; b) interval 1528,5–1535,0, core discharge 6,0 m, Lower Paleocene, limestone; c) interval 1526,7–1527,5, core discharge 3,5 m, Lower Paleocene, limestone; d) interval 1457,75–1463,25, core discharge 5,5 m, Upper Paleocene, siltstone

- III – известняк нижнепалеоценового возраста;
- IV – алевролитистый песчаник верхнепалеоценового возраста.

Внешний вид образцов кернового материала представлен на рис. 1.

Оценку действия кислотных составов на основе 15 %, 20 % и 24 % растворов соляной кислоты на керн производили по количеству растворенной породы в течение заданного времени при соответствующей пластовой температуре (53 °C). Для исследований использовали керновый материал, дезинтегрированный до фракции менее 0,2 мм. Следует отметить, что кислотный состав включал различные концентрации ингибитора, деэмульгатора, стабилизатора железа.

Результаты исследования растворяющей способности кислотных составов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Потеря массы образца кернового материала в кислотном составе

Table 2. Loss of mass of core material sample in acid composition

№ образца кернового материала Core sample number	Потеря массы образца керна за 24 ч, % Loss of mass of core sample for 24 hours, %		
	(HCl 15 %)	(HCl 20 %)	(HCl 24 %)
I	7,3	7,1	7,4
II	80,9	81,2	80,8
III	81,7	82,4	81,6
IV	10,0	9,8	9,9

Потеря массы образца керна за 24 часа практически не меняется в зависимости от концентрации кислотного состава. Кроме этого, проведенные лабораторные исследования на вторичное осадкообразование и определение коррозионной агрессивности кислотных составов позволили сделать следующие выводы:

- при нейтрализации истощенных кислотных составов до pH 6–7 выпадение вторичных осадков не наблюдается;
- скорость коррозии кислотных составов при 20 °C за 24 ч от 0,05 г/(м²·ч) до 0,14 г/(м²·ч) (при норме 0,2 г/(м²·ч)), скорость коррозии кислотных составов при 55 °C за 5 ч: 1,2 г/(м²·ч) – (15 % HCl); 3,9 г/(м²·ч) – (20 % HCl); 6,8 г/(м²·ч) – (24 % HCl).

Общим результатом данного этапа исследований является:

- образцы кернового материала № II и III более подвержены растворению в кислотных составах при пластовой температуре (53 °C). Потеря массы для образцов керна № II и III за 24 часа практически не меняется в зависимости от концентрации кислотного состава и составляет 81–82 %.
- образцы кернового материала № I и IV наименее растворимы в кислотных составах при пластовой температуре (53 °C). Потеря массы образ-

цов керна за 24 ч не меняется в зависимости от концентрации кислотного состава и составляет 7,5–10 %.

- для растворения одного и того же объема породы, представленного известняком, потребуется в 1,5–2 раза больше кислотного раствора. Моделирование увеличения объема закачиваемого реагента в промысловых условиях может привести к осложнениям при освоении, т. к. уменьшение концентрации кислоты возможно при увеличении объема водной составляющей, что в условиях наличия глинистого материала (20 %) может привести к разбуханию и ухудшению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора.

#### Второй этап работ

Следующим этапом исследований являлось обоснование технологии воздействия на призабойную зону пласта.

Анализ геологической информации, геологических мероприятий, истории эксплуатации и технического и технологического оборудования скважины № 1, результатов лабораторных исследований воздействия кислотного раствора на керне, отобранном из продуктивных пластов верхнего и нижнего палеоцена, позволил рассмотреть II варианта интенсификации добычи газа:

- I – обработка раствором соляной кислоты продуктивных пластов верхнего и нижнего палео-

цена путем последовательной закачки в скважину кислотного раствора и отклонителя;

- II – обработка раствором соляной кислоты продуктивных пластов нижнего палеоцена путем установки пакера между продуктивными пластами верхнего и нижнего палеоцена и последовательная обработка кислотным раствором и отклонителем продуктивных пластов нижнего палеоцена.

С целью прогнозирования эффективности предложенных технологий выполнено моделирование обработки призабойной зоны (ОПЗ) пласта с помощью программного обеспечения. Результаты расчетов свидетельствуют об эффективной реализации технологии, в том числе качественного решения вопроса о повышении продуктивности пластов в нижнем палеоцене и улучшение ФЕС в призабойной зоне пласта в верхнем палеоцене (рис. 2).

Предварительные расчеты эффективности I и II вариантов показали близкий технологический эффект от реализации технологий интенсификации добычи газа. Второй вариант, на наш взгляд, является нецелесообразным как по причине сложной технологической его реализации на платформе, так и со стороны экономической оценки. Вопрос о последовательной обработке всех продуктивных пластов необходимым объемом кислотного состава может быть успешно решен использованием отклонителя. Задачей отклонителя является изоляция «обработанного»

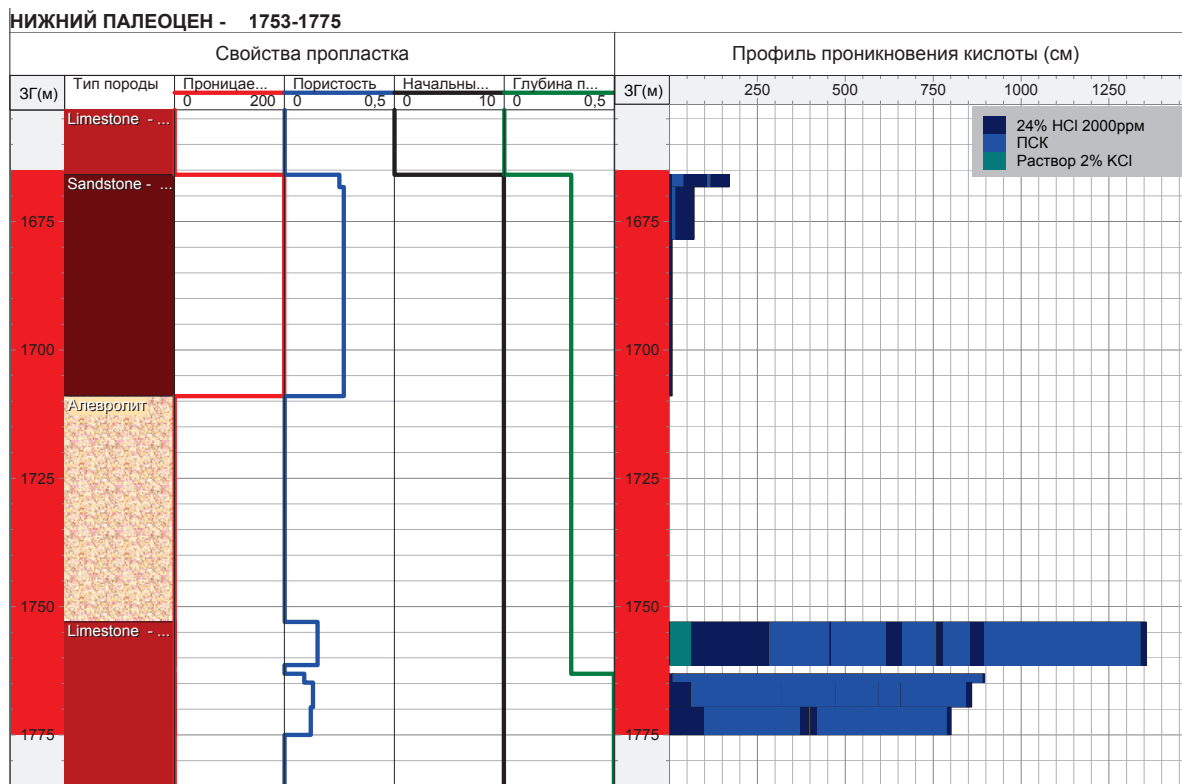


Рис. 2. Профиль проникновения в пропластки

Fig. 2. Side view of penetration into interlayers

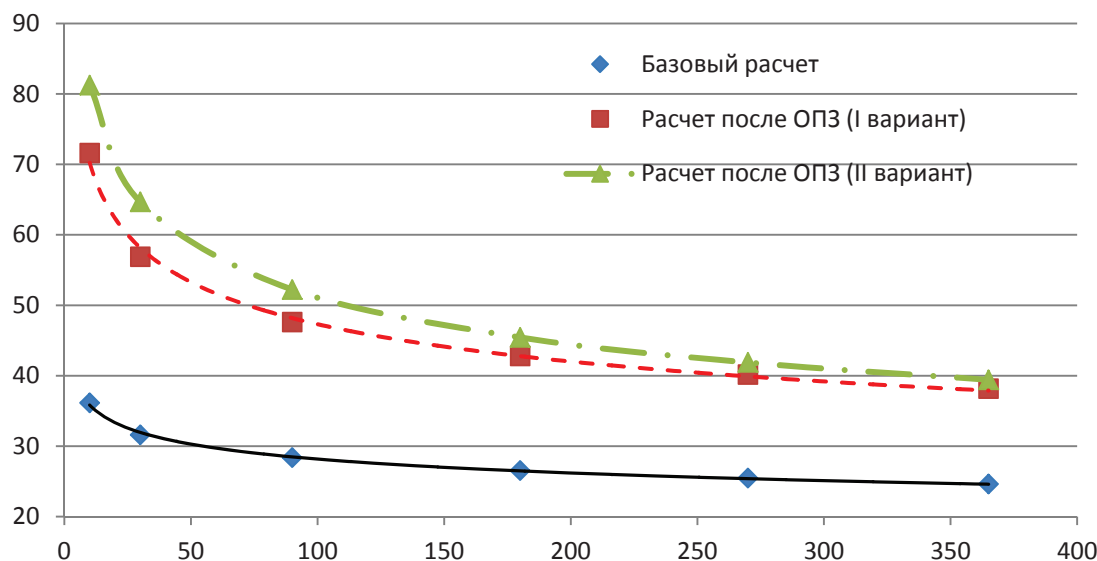


Рис. 3. Динамика прогнозных дебитов газа (тыс. м³/сут) по времени (сут)

Fig. 3. Dynamics of forecast gas production rates (thousand meters³/day) by time (days)

Таблица 3. Прогнозные дебиты газа по базовому варианту и после проведения геолого-технических мероприятий

Table 3. Forecast gas production rates for the basic version and after geological and technical measures

Временные «срезы» (сутки) Temporary «slices» (day)	Дебит газа/Gas yield		
	базовый вариант (тыс. м³/сут) basic version (thousand m³/day)	после проведения ОПЗ по I варианту (тыс. м³/сут) after the BT by the I variant (thousand m³/day)	после проведения ОПЗ по II варианту (тыс. м³/сут) after the BT by the II variant (thousand m³/day)
10	32,15	71,6	81,24
30	31,6	56,88	64,67
90	28,37	47,62	52,23
180	26,53	42,81	45,44
270	25,46	40,17	41,88
365	24,63	38,16	39,42
Накопленная добыча за год (млн м³) Accumulated production per year (million m³)	10,07	16,89	17,634

кислотным составом пласта от следующей «порции» кислотного раствора. Тем самым раствор отклонителя косвенно заменяет использование пакера. Результаты расчета дополнительно добытого газа для предложенных вариантов приведены на рис. 3 и в табл. 3.

#### Заключение

Для скважин, разрабатывающих газонасыщенные пласты с различным типом коллектора, в условиях месторождений морского шельфа обоснована технология интенсификации добычи газа. На основании лабораторных исследований на керне обоснован кислотный состав на основе 24 % соляной кислоты и предложена технология проведения обработки скважины, включающая последовательную закачку кислотного раствора и отклонителя. Расчет технологической эффективности показал, что при реализации данной технологии дополнительная добыча газа составит более 6,8 млн м³ газа за год.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буркова А.А. Проблемы эксплуатации скважин на поздней стадии разработки месторождений // Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». – Краснодар: ИД «Юг», 2017. – С. 42–43.
- Нетривиальные подходы к доразведке и освоению морских частей газовых и газоконденсатных залежей Харасавэйского и Крузенштернского месторождений на Приамальском шельфе / А.Ф. Огнев, А.Д. Митрофанов, А.А. Коробейников, Е.Ю. Трясин, М.Л. Цемкало, Д.А. Губарев // Газовая промышленность. – 2011. – № 13. – С. 72–76.
- Муллаев Б.Т., Тастемиров А.Р., Туркпенбаева З.Ж. Оптимизация проекта разработки и обустройства углеводородного месторождения на морском шельфе // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2016. – Т. 4. – № 4. – С. 11–27.
- Ягафаров А.К. Интенсификация притока пластовых флюидов в нефтяных и газовых скважинах. – Тюмень: Изд-во «Вектор Бук», 2010. – 231 с.
- Сингуров А.А. Интенсификация добычи углеводородов в низкопроницаемых терригенных пластах газовых скважин с помощью лимонной кислоты // Наука и техника в газовой промышленности. – 2014. – № 1 (57). – С. 82–85.
- Новиков А.В., Вольф А.А. Рекомендации по эксплуатации, ремонту, интенсификации притока газовых скважин на заключительной стадии разработки // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: материалы Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых. – Тюмень, 2017. – С. 92–95.

7. Карачарова Ю.В., Безносиков А.Ф. Технологии при проведении геолого-технических мероприятий на газовых скважинах // Современные технологии в нефтегазовом деле-2016: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию филиала. – Октябрьский, 2016. – С. 244–249.
8. Реагентные композиции, направленные на восстановление и повышение производительности газовых скважин со сложными горно-геологическими условиями / Р.А. Гасумов, В.А. Суковицын, А.А. Гаврилов, В.А. Супрунов, А.Я. Третьяк, Б.Ф. Галай, В.П. Мочалов // Нефть. Газ. Новации. – 2017. – № 8. – С. 52–57.
9. Шпильман Т.М., Кузьмина Е.С. Оценка экономической эффективности геолого-технических мероприятий // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 14 (175). – С. 71–76.
10. Determinants of oil and gas investments on the Norwegian Continental Shelf / M. Berntsen, K. Skjong Bøe, Th. Jordala, P. Molnár // Energy. – 2018. – V. 148. – P. 904–914.
11. CO<sub>2</sub> storage in depleted oil and gas fields in the Gulf of Mexico / E. Agartan, M. Gaddipati, Y. Yip, B. Savage, Ch. Ozgen // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2018. – V. 72. – P. 38–48.
12. System evaluation of offshore platforms with gas liquefaction processes / Tuong-Van Nguyen, Silvio de Oliveira Júnior // Energy. – 2018. – V. 144. – P. 594–606.
13. Decision making during treatment of bottomhole zone by polymeric systems on the basis of indefinite cluster analysis / T.Sh. Salavatova, A.S. Strekovb, M.K. Karazhanovac, B.N. Koilybayevd // Procedia Computer Science. – 2017. – V. 119. – P. 478–480.
14. Short-term production optimization of offshore oil and gas production using nonlinear model predictive control / A. Willersrud, L. Ims landa, S. Olav Haugerb, P. Kittilsenb // Journal of Process Control. – 2013. – V. 23. – № 2. – P. 215–223.
15. Jinxing Dai . Ch. 7. Coal-Derived Gas Fields and the Gas Sources of Offshore China // Giant Coal-Derived Gas Fields and their Gas Sources in China. – 2017. – V. 48. – P. 447–549.
16. Failure analysis of the offshore process component considering causation dependence / S.M. Deyaba, M. Taleb-berrouaneab, F. Khana, M. Yangac // Process Safety and Environmental Protection. – 2018. – V. 57. – P. 220–232.
17. Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: Insights from the literature / J. Ogdena, A. Myers Jaffe, D. Scheitrum, Z. McDonald, M. Millera // Energy Policy. – 2018. – V. 115. – P. 317–329.
18. Морев А.В., Морев В.А. Выбор оптимальных условий подготовки образцов керна к петрофизическим исследованиям // Естественные и технические науки. – 2014. – № 11–12 (78). – С. 144–147.
19. Зубков А.А., Гарушев Э.А., Бекетов С.Б. Влияние химических добавок на коррозионные свойства кислотных составов для воздействия на продуктивные нефтегазовые пласты // Нефть, газ и бизнес. – 2012. – № 8. – С. 58–61.
20. Интенсифицирующий кислотный состав для обработки низкопроницаемых карбонатных коллекторов и терригенных коллекторов с высокой карбонатностью / Л.А. Магадова, Е.Г. Гавей, М.Д. Пахомов, В.Б. Губанов, М.М. Мухин, М.В. Трофимова, Н.С. Маркова // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 6. – С. 80–82.

Поступила 26.04.2018 г.

#### Информация об авторах

**Смурыгин В.И.**, начальник группы по капитальному ремонту скважин управления буровых работ ГУП РК «Черноморнефтегаз».

**Рабеев Р.У.**, кандидат технических наук, начальник управления нефтегазового инжиниринга и проектирования Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Блинов С.А.**, кандидат технических наук, главный геолог отдела геолого-технических мероприятий ООО «Крезол-НефтеСервис».

**Бакишев Т.Б.**, заместитель директора ООО «Крезол-НефтеСервис».

**Султанов Ш.Х.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета, заведующий лабораторией «Математического моделирования процессов нефтегазоизвлечения» Института стратегических исследований Республики Башкортостан.



UDC 622.276

## JUSTIFICATION OF TECHNOLOGY OF STIMULATION OF GAS PRODUCTION FROM PRODUCTIVE FORMATIONS WITH VARIOUS TYPES OF RESERVOIRS IN THE CONDITIONS OF THE OFFSHORE FIELDS

Vladimir I. Smurygin<sup>1</sup>,  
vsmurygin@gas.crimea.ru

Ruslan U. Rabaev<sup>2</sup>,  
rabaevru@rusoil.net

Sergey A. Blinov<sup>3</sup>,  
blsergal@yandex.ru

Timur B. Bakishev<sup>3</sup>,  
t.bakishev@krezol.ru

Shamil Kh. Sultanov<sup>2</sup>,  
ssultanov@mail.ru

<sup>1</sup> Chernomorneftegaz,  
52, Kirov avenue, Simferopol, Republic of Crimea, 295000, Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Petroleum Technical University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450062, Russia.

<sup>3</sup> Cresol-NefteServis,  
2/4, Tramvaynaya street, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450027, Russia.

**The relevance** of the research is in the fact that at present the problem of maintaining hydrocarbon production levels is characterized, in particular, by the insufficient effectiveness of existing methods of stimulating and restoring the permeability of the productive formation due to small coverage of the productive formation with reagents, both in thickness and depth of penetration, and also low efficiency of development. In these conditions, the effective methods of well development are of great importance, as well as the methods of production intensification that allow the reservoir filtration characteristics to be resuscitated and improved in the bottomhole formation zone. This is especially true for the Black Sea shelf deposits, where a number of operational objects are represented by reservoirs-terrigenous and carbonate reservoirs that are being developed simultaneously, there are sections of wells with high heterogeneity of geological parameters.

**The main aim** of the research is to propose and justify the technology of intensification of gas production for wells, developing gas-saturated reservoirs with different types of reservoir, and also to justify the use of the proposed composition for well treatment and well treatment technology.

**Object:** well no. 1 of gas condensate field of the Black Sea shelf.

**Methods.** To substantiate qualitatively the impact technology on the bottomhole formation zone, the authors have carried out the geological and commercial analysis of development and performed the laboratory studies on selection of optimal acid composition on core material.

**Results.** The authors substantiated the technology of intensification of gas production for wells developing gas saturated reservoirs with different types of reservoir in conditions of offshore fields; proved the efficiency of using acidic composition based on 24 % hydrochloric acid and proposed and the technology of well treatment including sequential injection of acid solution and deflector.

### Key words:

Gas field of the offshore shelf, effective methods of well development, technology of gas production intensification, salt acid impact on the layer, restoration of formation permeability, treatment of bottomhole formation zone.

### REFERENCES

1. Burkova A.A. Problemy ekspluatatsii skvazhin na pozdney stadii razrabotki mestorozhdeniy [Problems of well operation at the late stage of field development]. *Sbornik tezisev dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashennoy 100-letiyu FGBOU VO «Kubanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet»* [Collection of abstracts of the International Scientific and Practical Reports dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of the FGBOU VO «Kuban State Technological University»]. Krasnodar, Yug Publ., 2017. pp. 42–43.
2. Ognev A.F., Mitrofanov A.D., Korobeynikov A.A., Tryasin E.Yu., Tsemkalo M.L., Gubarev D.A. Netrivialnye podkhody k dorazvedke i osvoeniyu morskikh chastey gazovykh i azokondensatnykh zalezhey Kharasaveyskogo i Kruzenshternskogo mestorozhdeniy na Priyamalskom shelfe [Nontrivial approaches to additional exploration and development of marine parts of gas and gas condensate deposits of Kharasavey and Kruzenshtern deposits on the Yamal shelf]. *Gazovaya promyshlennost*, 2011, no. 13, pp. 72–76.
3. Mullaev B.T., Tastemirov A.R., Turkpenbaeva Z.Z. Optimizatsii proekta razrabotki i obustroystva uglevodorodnogo mestorozhdeniya na morskoy shelfe [Optimization of the project of development and arrangement of a hydrocarbon deposit on the sea shelf]. *Nauchnye trudy NIPi Neftegaz*, 2016, no. 4, pp. 11–27.

4. Yagafarov A.K. Intensifikatsiya pritoka plastovykh flyuidov v neftnykh i gazovykh skvazhinakh [Intensification of tributaries of formation fluids in oil and gas wells]. Tyumen, Vektor Buk Publ., 2010. 231 p.
5. Singurov A.A. Intensifikatsiya dobychi uglevodorodov v nizkopronitsaemykh terrigennykh plastakh gazovykh skvazhin s pomoshchyu limonnoy kisloty [Intensification of hydrocarbon production in low permeable terrigenous reservoirs of gas wells with the help of citric acid]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 2014, no. 1 (57), pp. 82–85.
6. Novikov A.V., Wolf A.A. Rekomendatsii po ekspluatatsii, remontu, intensivatsii pritoka gazovykh skvazhin na zaklyuchitel'noy stadii razrabotki [Recommendations on operation, repair, intensification of the flow of gas wells at the final stage of development]. *Opyt, aktualnye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya, aspirantov i uchennykh* [Experience, current problems and prospects for development of oil and gas complex materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, PhD students and scientists]. Tyumen, 2017. pp. 92–95.
7. Karacharova Yu.V., Beznosikov A.F. Tekhnologii pri provedenii geologo-tekhnikeskikh meropriyatiy na gazovykh skvazhinakh [Technologies in geological and technical measures on gas wells]. *Sovremennye tekhnologii v neftegazovom dele-2016. Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu filiala* [Modern technology in the oil and gas business-2016. Proc. of the International Scientific and Technical Conference on the 60<sup>th</sup> anniversary of the branch]. Oktyabrskiy, UGNTU Publ., 2016. pp. 244–249.
8. Gasumov R.A., Sukovitsyn V.A., Gavrillov A.A., Suprunov V.A., Tretyak A.Y., Galay B.F., Mochalov V.P. Reagentnye kompozitsii, napravlennye na vosstanovlenie i povyshenie proizvoditelnosti gazovykh skvazhin so slozhnymi gorno-geologicheskimi usloviyami [Reagent compositions aimed at restoring and increasing the productivity of gas wells with complex mining and geological conditions]. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2017, no. 8, pp. 52–57.
9. Shpilman T.M., Kuzmina E.S. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti geologo-tekhnikeskikh meropriyatiy [Estimation of economic efficiency of geological and technical measures]. *Bulletin of the Orenburg State University*, 2014, no. 14 (175), pp. 71–76.
10. Berntsen M., Skjong Boe K., Jordala Th., Molnár P. Determinants of oil and gas investments on the Norwegian Continental Shelf. *Energy*, 2018, vol. 148, pp. 904–914.
11. Agartan E., Gaddipati M., Yip Y., Savage B., Ozgen Ch. CO<sub>2</sub> storage in depleted oil and gas fields in the Gulf of Mexico. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, vol. 72, pp. 38–48.
12. Tuong-Van Nguyen, Silvio de Oliveira Juniora. System evaluation of offshore platforms with gas liquefaction processes. *Energy*, 2018, vol. 144, pp. 594–606.
13. Salavatova T.Sh., Strekovb A.S., Karazhanovac M.K., Koilybayevd B.N. Decision making during treatment of bottomhole zone by polymeric systems on the basis of indefinite cluster analysis. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 119, pp. 478–480.
14. Willersrud A., Ims landa L., Olav Hauger S., Kittilsen P. Short-term production optimization of offshore oil and gas production using nonlinear model predictive control. *Journal of Process Control*, 2013, vol. 23, no. 2, pp. 215–223.
15. Jinxing Dai. Ch. 7. Coal-Derived Gas Fields and the Gas Sources of Offshore China. *Giant Coal-Derived Gas Fields and their Gas Sources in China*, 2017, vol. 48, pp. 447–549.
16. Deyaba S.M., Taleb-berrouaneab M., Khana F., Yangang M. Failure analysis of the offshore process component considering causation dependence. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, vol. 57, pp. 220–232.
17. Ogdena J., Myers Jaffe A., Scheitrum D., McDonald Z., Millera M. Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: Insights from the literature. *Energy Policy*, 2018, vol. 115, pp. 317–329.
18. Morev A.V., Morev V.A. Vybor optimalnykh usloviy podgotovki obraztsov kerna k petrofizicheskim issledovaniyam [Choice of optimum conditions for preparation of core samples for petrophysical studies]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 11–12 (78), pp. 144–147.
19. Zubkov A.A., Garushev E.A., Beketov S.B. Vliyaniye khimicheskikh dobavok na korrozionnye svoystva kislotnykh sostavov dlya vozdeystviya na produktivnye neftegazovye plasty [Influence of chemical additives on corrosive properties of acid formulations for impact on productive oil and gas reservoirs]. *Neft, gaz i biznes*, 2012, no. 8, pp. 58–61.
20. Magadova L.A., Gaevoy E.G., Pakhomov M.D., Gubanov V.B., Mukhin M.M., Trofimova M.V., Markova N.S. Intensifikatsiya kislotoy sostav dlya obrabotki nizkopronitsaemykh karbonatnykh kollektorov i terrigennykh kollektorov s vysokoy karbonatnostyu [Intensifying acid composition for treatment of low-permeability carbonate reservoirs and terrigenous reservoirs with high carbonate content]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2010, no. 6, pp. 80–82.

Received: 26 April 2018.

#### Information about the authors

**Vladimir I. Smurygin**, head of the group on capital repair of wells of the drilling department, Chernomorneftegaz.

**Ruslan U. Rabaev**, Cand. Sc., head of oil and gas engineering, Ufa State Petroleum Technical University.

**Sergey A. Blinov**, Cand. Sc., chief geologist, Cresol-NefteServis.

**Timur B. Bakishev**, deputy director, Cresol-NefteServis.

**Shamil Kh. Sultanov**, Dr. Sc., associate professor, professor, Ufa State Petroleum Technical University, head of the laboratory «Mathematical Modeling of Oil and Gas Extraction», Institute of Strategic Studies of the Republic of Bashkortostan.

УДК 553.411+551.311.231

## МИНЕРАЛЬНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ЗОЛОТОНОСНЫХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ ТОМЬ-ЯЙСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Янченко Ольга Михайловна<sup>1</sup>,  
olminayanchenko@mail.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович<sup>1</sup>,  
v\_g\_v@tpu.ru

Тимкин Тимофей Васильевич<sup>1</sup>,  
timkin@tpu.ru

Зиаи Мансур<sup>2</sup>,  
m.ziai47@gmail.com

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

<sup>2</sup> Шахрудский технологический университет,  
Иран, 3619995161, Болвар Данешка, Шахруд.

**Актуальность.** Коры выветривания Томь-Яйского междуречья могут быть объектами промышленной добычи золота. В Томь-Яйском междуречье коры выветривания широко распространены, установлена их золотоносность, но строение, минеральный состав и геохимические особенности изучены недостаточно.

**Цель:** выявить минерально-геохимическую зональность кор выветривания Томь-Яйского междуречья для решения вопросов генезиса и разработки критериев прогнозирования их золотоносности.

**Объект:** коры выветривания по породам палеозойского фундамента Томь-Яйского междуречья.

**Методы.** Кристалломорфологические особенности золота и минералов-спутников, парагенетические ассоциации минералов изучались микроскопически под бинокуляром, в отраженном свете, химический состав минералов – методом ИСП-масс-спектрометрии, на рентгено-флюоресцентном микроскопе HORIBA Scientific XGT-7200, сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBU с ЭДС OXFORD X-Max 50. Сокращенный химический состав продуктов выветривания определялся методом ИСП-масс-спектрометрии. Минеральный состав пелитовой фракции определялся методом рентгенофазового количественного анализа на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker. Проведен сокращенный гранулометрический анализ продуктов выветривания разных зон профиля.

**Результаты.** В Томь-Яйском междуречье установлены остаточные и переотложенные коры выветривания. Продукты выветривания представлены песчано-алевритовым, глинистым и щебнисто-древяным материалом, с преобладанием песчаной и алевритоглинистой составляющей. Установлен состав и распределение по разрезу глинистых минералов, карбонатов, пирита, золота и других минералов. Состав остаточных кор выветривания монтмориллонит-гидрослюдисто-каолининовый. В строении полного профиля выделяются зоны: 1) дезинтеграции, 2) гидратации и 3) гидролиза. Дана минерально-геохимическая характеристика выделенных зон. На основании сокращенного химического анализа рассчитаны основные геохимические модули.

### Ключевые слова:

Остаточная кора выветривания, переотложенная кора выветривания, золото, минерально-геохимическая зональность, Томь-Яйское междуречье.

### Введение

Золотоносные коры выветривания – новый для Томской области геолого-промышленный тип месторождений золота, которому в настоящее время уделяется большое внимание. Это обусловлено близповерхностным залеганием, высокой дифференциацией вещества с высвобождением золота, его обогащением и укрупнением, что обеспечивает высокую экономическую эффективность отработки подобных месторождений, прежде всего открытым способом. В то же время многие теоретические вопросы накопления золота в корях выветривания являются дискуссионными. В Томь-Яйском междуречье коры выветривания широко развиты, золотоносность их установлена, но изучена слабо, этим и определяется актуальность исследования. Наиболее детально коры выветривания изучены нами в цен-

тральной части Томь-Яйского междуречья, в пределах Халдеевской и Ушайской площадей (рис. 1).

Целью данного исследования является получение дополнительных сведений о строении профиля коры выветривания, особенностях его геохимической и минералогической зональности для решения вопросов генезиса и прогноза рудоносности кор выветривания.

### Геологическое строение района

В региональном плане изучаемый район находится в области сочленения крупных геологических структур – Колывань-Томской складчатой зоны, Западно-Сибирской плиты, Кузнецкого прогиба и Кузнецкого Алатау. В геологическом строении принимают участие вещественные комплексы трех структурных этажей.



Нижний структурный этаж образован докембрийскими и кембрийскими сложнодислоцированными вулканогенно-осадочными отложениями север-северо-западного простирания, выходящими на поверхность в пределах Яйского горста, продолжающего структуры Кузнецкого Алатау.

Средний структурный этаж представлен девон-каменноугольными отложениями Колывань-Томской складчатой зоны, Кузнецкого Алатау и Кузнецкого прогиба. Структуры Кузнецкого прогиба проявлены в виде вытянутых в субмеридиональном направлении грабен-синклиналей: Ташминской на севере и Анжерской на юге района. На востоке эти структуры надвинуты на Яйский горст, а на западе через Томский надвиг перекрыты вулканогенно-осадочными толщами Колывань-Томской шарьяжно-складчатой зоны. Колывань-Томская складчатая зона представлена серией надвиговых пластин, сложенных отложениями митрофановской, лебедянской, пачинской и юргинской свит. Западной границей структуры является круто па-

дающий на запад Халдеевский разлом, восточной – Томский надвиг. Западнее Колывань-Томская складчатая зона представлена Томским синклинорием (прогибом). В пределах синклинория выделяется ряд син- и антиклинальных складок, основными из которых являются: Луговая, Лязгинская и Богашевская антиклинали, сложенные в ядре углеродистыми алевролитами ярской-саламатовской толщ, и Корниловская и Петуховская синклинали, сложенные породами лагерносадской и басандайской свит.

В смятых в складки терригенных отложениях проявлены разрывные структуры, которые подразделяются на три основные группы: 1) продольные син- и послескладчатые, пермского возраста, связанные с формированием Колывань-Томской складчатой зоны и Томского синклинория; 2) рифтогенные, триасового возраста, обусловленные развитием Сибирского суперплума, заложением Западно-Сибирской плиты и формированием томского комплекса даек и силлов. 3) неотектонические,

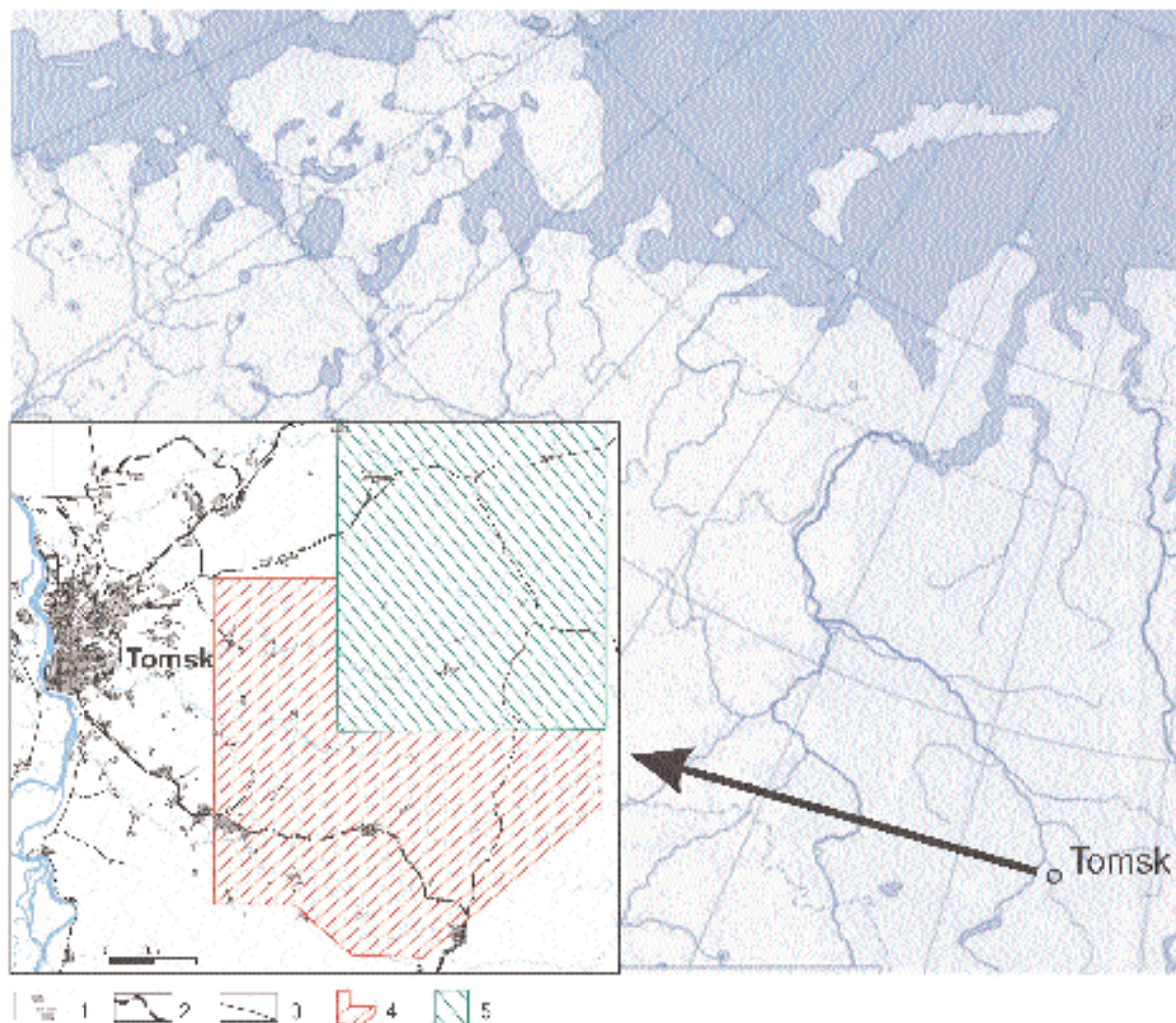


Рис. 1. Обзорная карта: 1 – населенные пункты; 2 – железная дорога; 3 – шоссейные дороги; 4 – Ушайская площадь; 5 – Халдеевская площадь

Fig. 1. Overview map: 1 – settlements; 2 – railway; 3 – highways; 4 – Ushayskaya area; 5 – Khaldeevskaya area



эпиplatformенные олигоцен-эоплейстоценового возраста.

Верхний структурный этаж представлен отложениями меловой, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем платформенного чехла Западно-Сибирской плиты.

Разрывные нарушения в верхнекайнозойских рыхлых и слабоуплотненных осадках проявляются в виде флексурно-разрывных зон. Наиболее значительная активизация этой системы разломов произошла в олигоцене и в конце неогена–эоплейстоцене. В результате произошла существенная эрозия кор выветривания и их переотложение в виде аллювиально-пролювиальных отложений нижней части новомихайловской свиты, евсинской и кирсановской свит [1].

#### Фактический материал и методы исследования

Фактическим материалом для проведения исследования послужили керновые пробы 98 скважин, бороздовые и задиrkовые пробы 23 канав. Проведен сокращенный полуколичественный минералогический анализ более 900 шлихов из керновых, бороздовых и задиrkовых проб, отобраны мономинеральные фракции карбонатов, пирита и золота. Керновые, бороздовые, задиrkовые пробы и шлихи-концентраты проб анализировались в Химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск) методом ИСП-масс-спектрометрии на 25 элементов. Работы проводились на масс-спектрометрах ELAN-9000 DRC-e, Agilent-7700x, Agilent-7900. Методом ИСП-масс-спектрометрии определен сокращенный химический состав продуктов выветривания ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), элементы-примеси и химический состав монофракций минералов. На сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBU с ЭДС OXFORD X-Max 50 и рентгено-флуоресцентном микроскопе HORIBA Scientific XGT-7200 в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (НИ ТПУ) изучен химический состав и внутренняя структура золота и минералов-спутников. Определение гранулометрического (зернового) состава, содержания крупнозернистых включений, определение остатка на сите 0,063 мм и тонкодисперсных фракций в глинистых продуктах выветривания проводилось в Химико-аналитическом центре «Плазма» и Аналитико-технологическом сертификационном испытательном центре ФГУП «ЦНИИГеолнеруд» (г. Казань). Минеральный состав пелитовой фракции определялся методом рентгенофазового количественного анализа на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker в Аналитико-технологическом сертификационном испытательном центре ФГУП «ЦНИИГеолнеруд» и на установке рентгеноструктурного анализа (ДРОН-ЗМ) в НИ ТПУ.

#### Характеристика кор выветривания

В Томь-Яйском междуречье практически повсеместно на породах палеозойского фундамента

развиты остаточные коры выветривания площадного и линейного типов мел-палеогенового возраста, на отдельных участках присутствуют продукты ближайшего переотложения этих кор. Остаточная кора выветривания, как правило, часто представлена только зоной дезинтеграции мощностью в первые метры, либо полностью эродирована на участках, приуроченных к долинам современных рек. Мощность и строение кор выветривания изменяется в зависимости от литологического состава и степени проницаемости материнских пород. Полный профиль выветривания проявляется в зонах повышенной проницаемости исходных пород, связанных с тектоническими нарушениями, в некоторых случаях залеченных интрузивными образованиями базитового состава. В полном профиле остаточной коры выветривания выделяются снизу вверх следующие зоны: дезинтеграции, гидратации и гидролиза. Сокращенный профиль характеризуется развитием неполного числа зон [2].

*Площадные остаточные коры выветривания Халдеевской площади* представлены породами зон дезинтеграции и гидратации, то есть в различной степени выветрелыми породами юргинской и басандайской, реже пачинской и митрофановской свит, замещаемыми по зонам трещиноватости гидрослюдами, что приводит к осветлению пород – черные, темно-серые алевролиты и песчаники превращаются светло-серые, желтовато-бурые гидрослюдизированные породы, сохраняющие структуру замещаемых пород. Мощность площадных кор выветривания по вертикали в среднем не превышает 5...10 м.

*Линейные остаточные коры выветривания* приурочены к тектонически ослабленным участкам, которыми являются в основном узлы пересечения дайковых рифтогенных поясов с продольными зонами трещиноватости и разрывных нарушений, в том числе с зонами послышной кварцевой минерализации в палеозойских терригенных породах.

Линейные коры отличаются от площадных глубиной распространения и степенью преобразования исходных пород. Они представлены породами не только зон дезинтеграции и гидратации, но и зоны гидролиза. Мощность зоны гидролиза составляет 0,8...39,5 м, она представлена глинами и глинистыми песками, каолинированными либо существенно каолинизированными, охристыми, белесыми, зеленовато-охристыми, серовато-розовыми, по долеритам – зеленовато и голубовато-серыми, полутвердыми породами. Глины преимущественно бесструктурные, реже со слабо выраженной реликтовой сланцеватостью, в различной степени запесочены и ожелезнены.

В верхней части разреза, в зоне аэрации, коры выветривания подвергаются окислительным преобразованиям. За счет постоянной примеси гидроокислов железа, имеющих преимущественно пятнисто-полосчатый характер распределения, глины приобретают охристые оттенки.

Установленная вертикальная мощность линейной коры выветривания, по данным бурения, превышает 68,7 м, составляя в среднем около 30 м.

Исследование состава примесных элементов в продуктах остаточной коры выветривания позволило выделить четыре геохимических ассоциации: 1) Mn, Fe, Co, Zn – ассоциация элементов, характерная для минералов группы карбонатов, образующихся в результате гипергенных изменений материнских пород (Co и Zn входят в состав карбонатов в качестве примеси); 2) Sn, Tl, Bi – элементы-примеси в пирите и гипергенном золоте; 3) P, Zn, Hf – ассоциация элементов, характеризующая геохимические особенности акцессорных минералов материнских пород – циркона, редкоземельных фосфатов; 4) As, Sb, W, Au – элементы-индикаторы первичной золоторудной минерализации, в качестве примесей присутствующие в составе новообразованных гипергенных пирита и карбонатов. С помощью электронной микроскопии установлено техногенное происхождение примесей вольфрама в пробах, обусловленное разрушением породоразрушающего инструмента в процессе бурения; наибольшие концентрации вольфрама характерны для интервалов с обильным содержанием щебня и дресвы кварца.

*Переотложенные коры выветривания* представлены глинами различного цвета, с дресвой и щебнем кварца, реже с галькой кварца, выветрелым щебнем алевролитов и песчаников палеозоя, обломками кремней, кварцитовидных песчаников и конгломератов эоцена. В аллювиальных отложениях наблюдается иногда галька черных кремней, характерная для дальнеприносных отложений. По положению в разрезе, составу пород, структуре осадков, окатанности обломков эти породы могут быть отнесены к близко- и дальнеприносным отложениям кирсановской свиты, к базальным горизонтам тайгинской свиты.

*На Ушайской площади остаточная кора выветривания* сформирована по песчаникам и алевролитам басандайской свиты. Мощность ее, как правило, не превышает 15 м, увеличиваясь в отдельных скважинах до 34 м.

Зона дезинтеграции представлена щебнистым, дресвяно-щебнистым материалом исходных пород, сложенных светло-серыми, голубовато-серыми мелкозернистыми песчаниками и темно-серыми, серыми алевролитами, в различной степени выветрелыми, иногда с мелким щебнем прожилкового кварца. Присутствует постоянная примесь глинистого материала. Мощность зоны дезинтеграции колеблется в пределах от 0,5 до 5 м.

В зоне гидратации преобладают темно-серые, черные, сизые с голубоватым или зеленоватым оттенком преимущественно гидрослюдистые глины с дресвой и щебнем выветрелых пород и обломками кварца. Дайки габбро-долеритов в зоне гидратации превращаются в дресву, характеризующуюся значительным количеством гидрослюд.

В зоне гидролиза преобладают жирные гидрослюдисто-каолинистые, часто песчаные глины преимущественно светло-бурого, светло-серого и серого цвета, иногда с голубоватым оттенком. В глинах присутствует единичный мелкий щебень кварца.

Сокращенный химический анализ 95 проб из зоны гидролиза остаточной коры выветривания показал, что в составе пород преобладают кремнезем (23...60 %, в среднем 39 %), глинозем (12...22 %, в среднем 18,7 %), содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  изменяется от 1 до 15,5 %, составляя в среднем 4,5 %. Породы относятся к полукислым грубодисперсным глинам со средним и высоким содержанием красящих оксидов. По имеющимся данным сокращенного химического анализа были рассчитаны основные геохимические модули, указывающие на степень химического выветривания материнских пород [3] – гидролизатный ( $\text{ГМ}=(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})/\text{SiO}_2$ ), алюмокремниевый ( $\text{АМ}=\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ) и титановый ( $\text{ТМ}=\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) модули. В соответствии с рассчитанными значениями титанового модуля на построенной диаграмме зависимости  $\text{ТМ}-\text{TiO}_2$  фигуративные точки изучаемых глинистых пород преимущественно располагаются в области существенно гидрослюдистых глин. Согласно рассчитанным значениям гидролизатного (как правило,  $\text{ГМ}>0,5$ ) и алюмокремниевого модулей (преимущественно,  $\text{АМ}>0,35$ ), изучаемые глинистые породы образованы в результате значительного выветривания и соответствуют зоне гидролиза остаточной коры выветривания. В соответствии со значениями ТМ и АМ определено, что образование кор выветривания происходило в гумидной климатической обстановке [3–9].

На остаточной коре выветривания залегают *переотложенные коры выветривания*. В строении переотложенных кор выветривания, как правило, выделяется обогащенный золотом базальный горизонт щебнисто-глинистого состава, представленный белыми каолинистыми глинами, дресвой и более крупными, в различной степени окатанными, обломками жильного кварца размером до 30 см в диаметре и глинизированными обломками пород средней мощностью до 2 м. Выше, в переотложенных корах, преобладают рыхлые отложения глинисто-алеврито-песчаного состава с кварц-гидрослюдисто-каолинистым цементом. В верхней глинисто-песчаной части переотложенных кор иногда устанавливается несколько уровней развития линз и прослоев песчано-дресвяного кварцевого материала в глинисто-алевритовом каолинистом цементе. В самой верхней части переотложенных кор выветривания имеют глинистый и алеврито-глинистый каолинистый состав и с трудом отличаются от стратифицированных отложений новомихайловской свиты глинисто-песчаного состава.

Согласно результатам сокращенного химического анализа проб из переотложенных кор выветривания, содержание кремнезема составляет

32,3...42,3 %, в среднем 35,7 %, глинозем (17,7...19,7, в среднем 18,4 %), содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  изменяется от 3,5 до 6,3 %, составляя в среднем 5 %, содержание  $\text{TiO}_2$  в среднем составляет 0,8 %. Породы относятся к полукислым грубодисперсным глинам с высоким содержанием красящих оксидов.

По имеющимся данным сокращенного химического анализа были рассчитаны основные геохимические модули, указывающие на степень химического выветривания материнских пород [3] – гидролизатный ( $\text{ГМ}=(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})/\text{SiO}_2$ ), алюмокремниевый ( $\text{АМ}=\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ) и титановый ( $\text{ТМ}=\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) модули. В соответствии с расчи-

танными значениями титанового модуля на построенной диаграмме зависимости  $\text{ТМ}-\text{TiO}_2$  большинство фигуративных точек изучаемых глинистых пород преимущественно располагается в области существенно гидрослюдистых глин, также фигуративные точки располагаются в области пересечения существенно гидрослюдистых и существенно монтмориллонитовых глин. Согласно рассчитанным значениям гидролизатного модуля, установлены значительные его вариации (0,07...1,54; среднее значение  $\text{ГМ}=0,39$ ), повышенные значения  $\text{ГМ}$  (больше нормы для платформенных глин в интервале 0,3...0,55) указывают на примесь продуктов гумидного выветривания суб-

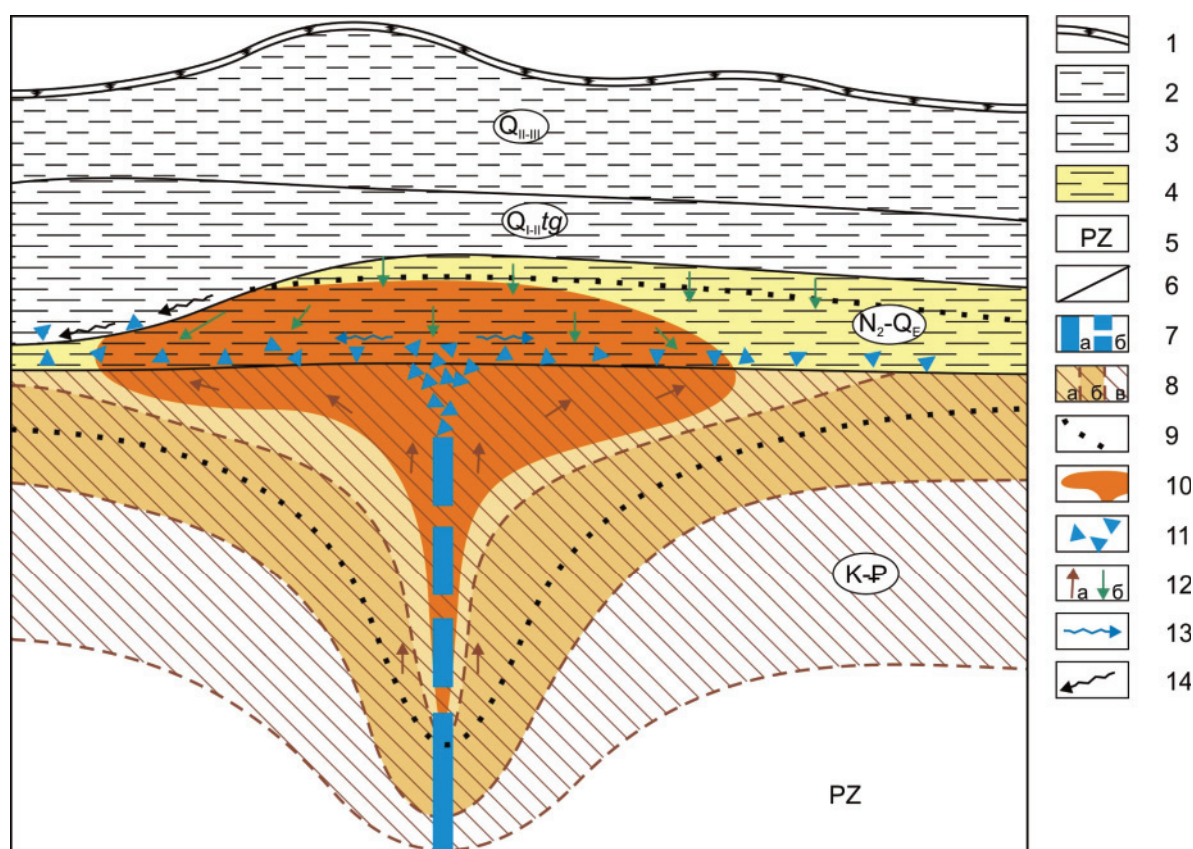


Рис. 2. Сводная модель полного профиля коры выветривания по Е.В. Черняеву [2]: 1 – почвенно-растительный слой; 2 – покровные суглинки и глины QII–III; 3 – глины, суглинки тайгинской свиты QI–II<sub>tg</sub>, в основании с дресвой кварца и с обломками кор выветривания; 4 – переотложенная кора выветривания N2–QE: глины с галькой, щебнем и дресвой кварца; 5 – породы палеозойского фундамента; 6 – геологические границы между стратиграфическими подразделениями; 7 – зоны золото-кварцевой минерализации: а) гипогенные; б) гипогенно-гипергенные, дезинтегрированные, с остаточным и наложенным гипергенным золотом; 8 – остаточная кора выветривания K–P–: а) зона гидролиза; б) зона гидратации; в) зона дезинтеграции; 9 – область смешения седиментационных и вадозных вод; 10 – коры выветривания с гипергенным золотом; 11 – дресва и щебень кварца; 12 – направление миграции подземных вод: а) элизионных седиментационных; б) грунтовых вадозных; 13 – направление переотложения золотоносного материала в рыхлых отложениях неогена-эоплейстоцена; 14 – направление переотложения золотоносного материала в четвертичных рыхлых отложениях

Fig. 2. Integrated model of the complete profile of the weathering crust by E.V. Chernyaev [2]: 1 is the soil; 2 is the covering loam and clay QII–III; 3 is the clay, loam of taiginskaya suite QI–II<sub>tg</sub>, in the basement with fragments of quartz and with debris of weathering crusts; 4 is the redeposited weathering crust N2–QE: clay with pebbles, rubble and gruss of quartz; 5 are the paleozoic rocks; 6 are the geological boundaries between stratigraphic subdivisions; 7 are the zones of gold-quartz mineralization: a) hypogenous; б) hypogene-hypergenic, disintegrated, with residual and superimposed gold; 8 is the residual weathering crust K–P–: а) hydrolysis zone; б) zone of hydration; в) zone of disintegration; 9 is the area of mixing the sedimentary and vadose waters; 10 are the weathering crusts with hypergenic gold; 11 is the gruss and rubble quartz; 12 is the direction of groundwater migration: а) elysion sedimentation; б) groundwater vadose; 13 is the direction of redeposition of gold-bearing material in loose Neogene-Eopleistocene sediments; 14 is the direction of redeposition of gold-bearing material in quaternary loose sediments



страта любого состава. Согласно рассчитанным значениям алюмокремниевого модуля (0,05...1,3; среднее значение  $AM=0,32$ ), изучаемые глинистые породы образованы в результате размыва гумидных кор выветривания [3–9].

Сводный разрез полного профиля коры выветривания, согласно геолого-поисковой модели Е.В. Черняева [2], представлен на рис. 2, он включает зоны дезинтеграции, гидратации и гидролиза остаточной коры выветривания и переотложенную кору выветривания. Образование кор выветривания происходит в результате смещения близповерхностных грунтовых вод нисходящей миграции и подземных седиментационных вод восходящей миграции в зоне смены поровой проницаемости осадочного чехла на трещинную проницаемость фундамента. Поступление напорных седиментационных вод из Западно-Сибирского артезианского бассейна контролируется зонами трещиноватости, вмещающими дайковые пояса, занимающие поперечное положение к границам бассейна [2].

Сокращенный гранулометрический состав кор выветривания Халдеевской и Ушайской площадей представлен в табл. 1. Зона дезинтеграции, как правило, представлена в различной степени трещиноватыми, раздробленными выветрелыми материнскими породами, при этом содержание щебнисто-дресвяной фракции превышает 50 %, количество песчано-алевритового и глинистого материала варьирует [10, 11]. В составе щебнисто-дресвяной фракции (>1 мм) установлены обохренные обломки выветрелых филлитовидных сланцев, алевритов, кварца, песчаников, реже долеритов, псевдоморфозы гидроокислов железа по пириту и гетиту. В зонах гидратации и гидролиза, переотложенной коре выветривания преобладают частицы пелитовой размерности.

Таблица 1. Сокращенный гранулометрический состав продуктов коры выветривания

Table 1. Abridged size distribution of the weathering crust products

Фракции (мм)/Выход фракций (%) Fractions (mm)/Output of fractions (%)											
щебнистая rubble	дресвяная grussy			песчаная sand			алевритовая aleurite		пелитовая pe- litic		
>10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,06	0,06–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Переотложенная кора выветривания / Redeposited weathering crust											
существенно песчано-глинистый разрез essentially sandy-argillaceous incision											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,0	0,0	0,2	0,2	0,2		8,9		30,5	13,6	23,7	22,7
со значительной примесью щебнисто-дресвяной фракции with a significant admixture of rubble and gruss											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13,0		11,7				12,9				62,4	
Остаточная кора выветривания / Residual weathering crust											
Зона гидролиза / Hydrolysis zone											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,0	0,0	1,0	1,3	1,6		13,2		23,6	15,1	31,9	12,3
Зона гидратации / Hydration zone											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	35,7					20,2				44,1	

Выделение переотложенной коры выветривания и зон остаточной коры выветривания обусловлено соотношением фракций по размерности в продуктах выветривания и процентным содержанием соответствующих минералов пелитовой фракции по разрезу, а также характером распределения, соотношением и особенностями морфологии глинистых, аксессуарных минералов и золота (рис. 3).

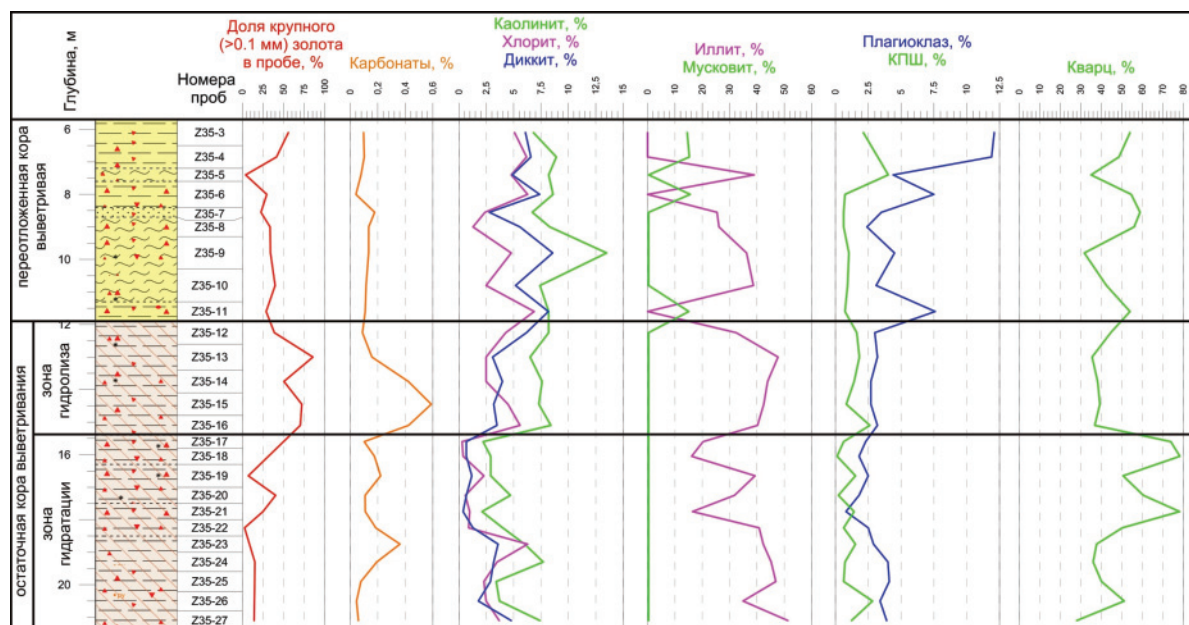


Рис. 3. Графики изменения содержания крупного золота, карбонатов и минералов пелитовой фракции

Fig. 3. Graphs of changes in the content of large gold, carbonates and minerals of the pelite fraction



Вещественный состав кор выветривания зависит от состава исходных пород и изменяется по разрезу. В зоне дезинтеграции породы по трещинам замещаются хлоритом, по плагиоклазам развиваются гидрослюды, калиевые полевые шпаты замещаются минералами группы каолинита. Вверх по разрезу степень изменения исходных пород возрастает, в самых верхних горизонтах остаточной коры выветривания наиболее распространены новообразованными минералами являются каолинит, гидрослюды и гидроокислы железа. Особенно хорошо устанавливается граница между переотложенной и остаточной корой выветривания. Переотложенная кора выветривания характеризуется наибольшим разнообразием акцессорных минералов, большинство минералов тяжелой и легкой фракций окатаны, для этой части разреза характерно присутствие окатанного золота и его зерен со сглаженными вследствие транспортировки очертаниями. В остаточной коре выветривания акцессорные минералы отличаются заметным разнообразием лишь в зоне гидролиза, в зонах дезинтеграции и гидратации их общее количество снижается, при этом минералы тяжелой и легкой фракций не несут следов окатывания, золотины остаточной коры выветривания также имеют рудный облик [9–18]. Минеральный состав выделенных зон коры выветривания по данным изучения Ушайской и Халдеевской площадей близкий и отражен в табл. 2, 3.

Золото остаточной коры выветривания имеет рудный облик, большинство золотин относится к неправильному морфологическому типу. Наблюдается общая тенденция уменьшения размерности выделений золота с глубиной. Среди золотин преобладают цементационные, имеющие ажурную и комковидную формы. Интерстициальные выделения золота имеют преимущественно трёхмерную комковидную форму, с отпечатками вмещающих минералов с угловатой блестящей поверхностью, либо следы вдавливания с шагреновой поверхностью. Единичные зерна имеют чешуйчатую и пластинчатую формы. Гемиидиоморфные золотишки представлены неправильными комковидными выделениями, пластинчатыми формами, как правило, с ксеноморфными ответвлениями, реже с ограниченными выступами. Идиоморфный тип представлен пластинчатыми и проволоковидными образованиями, единичными плохоограниченными изометричными кристаллами золота [16].

Для переотложенной коры выветривания характерно наличие золотинок со следами транспортировки, с тенденцией снижения таких золотинок по мере перехода к подошве. Золотинки со следами транспортировки характеризуются более крупными (по сравнению с золотом «рудного» облика) размерами, имеют сглаженные очертания (иногда до совершенной степени окатанности), представлены трёхмерными изометричными, близкими к округлой форме, неправильными или несколько удлинёнными, иногда уплощенными образованиями.

Характерно наличие золотинок, обрастающих корочкой новообразованного более высокопробного золота [19, 20].

Таблица 2. Минеральный состав и зональность пелитовой фракции коры выветривания\*

Table 2. Mineral composition and zonation of pelitic fraction of weathering crusts\*

Переотложенная кора выветривания Redeposited weathering crust	Кв (47 %), минералы гр. каолинита (К (15,3 %), Дк (3 %)), минералы гр. гидрослюд (Муск (6,1 %), Ил (14 %)), минералы гр. ПШ (Пл (5,7 %), КПШ (3,7 %)), минералы гр. монт-мориллонита (Хл (2,2 %), смешанослойный См (2,8 %)) Q (47 %), minerals of kaolinite group (K (15,3 %), Dk (3 %)), minerals of hydromica group (Musc (6,1 %), Il (14 %)), minerals of FS group (Pl (5,7 %), PF (3,7 %)), minerals of montmorillonite group (Chl (2,2 %), mixed-layer Sm (2,8 %))
Зоны остаточной коры выветривания Zone of residual weathering crust	гидролиза zone of hydrolysis
	Кв (36,4 %), минералы гр. каолинита (К (22,5 %), Дк (2 %)), минералы гр. гидрослюд (Муск (9,5 %), Ил (21,1 %)), минералы гр. ПШ (Пл (3,3 %), КПШ (3,2 %)), минералы гр. монтмориллонита (Хл (1,9 %)), Ca, G Q (36,4 %), minerals of kaolinite group (K (22,5 %), Dk (2 %)), minerals of hydromica group (Musc (9,5 %), Il (21,1 %)), minerals of FS group (Pl (3,3 %), PF (3,2 %)), minerals of montmorillonite group (Chl (1,9 %)), Ca, G
	гидратации zone of hydration
дезинтеграции zone of disintegration	Кв (53,2 %), минералы гр. каолинита (К (4,3 %), Дк (1,8 %)), минералы гр. гидрослюд (Ил (35 %)), минералы гр. ПШ (Пл (2,7 %), КПШ (0,9 %)), минералы гр. монтмориллонита (Хл (2,1 %)) Q (53,2 %), minerals of kaolinite group (K (4,3 %), Dk (1,8 %)), minerals of hydromica group (Il (35 %)), minerals of FS group (Pl (2,7 %), PF (0,9 %)), minerals of montmorillonite group (Chl (2,1 %))
	Кв, Ка, минералы гр. ПШ (Пл, КПШ), минералы гр. гидрослюд (Муск, Ил), минералы гр. монтмориллонита (Хл) Q, Ca, minerals of FS group (Pl, PF), minerals of hydromica group (Musc, Il), minerals of montmorillonite group (Chl)

Кв – кварц, К – каолинит, Дк – диксит, Муск – мусковит, Ил – иллит, ПШ – полевые шпаты, Пл – плагиоклаз, КПШ – калиевый полевой шпат, Хл – хлорит, См – смектит, Ка – кальцит, Г – гетит, гр. – группа. \*В скобках среднее содержание минерала.

Q – quartz, K – kaolinite, Dk – dickite, Musc – muscovite, Il – illite, FS – feldspar, Pl – plagioclase, PF – potassic feldspar, Chl – chlorite, Sm – smectite, Ca – calcite, G – goethite. \*The average mineral content is indicated in parentheses.

Среди обнаруженных в переотложенной коре выветривания золотинок «рудного» облика преобладают цементационные, ажурные, кружевные, комковидные. Также присутствуют интерстициальные выделения с блестящими поверхностями отпечатков вмещающих минералов, единичные пластинчатые и чешуйчатые зерна. Идиоморфные золотишки представлены единичными плохоограниченными или искаженными кристаллами с преобладанием граней октаэдра, реже встречаются брусковидные формы и гемиидиоморфные зерна с ксеноморфными отростками и предполагаемыми недооформленными гранями.

Из сульфидов в остаточной коре выветривания постоянно присутствует пирит, для которого характерна тенденция повышения содержания от

**Таблица 3.** Минеральный состав и зональность песчано-алевритовой фракции коры выветривания

**Table 3.** Mineral composition and zonation sand-aleurite fraction of weathering crusts

Переотложенная кора выветривания Redeposited weathering crust		Зоны остаточной коры выветривания Zone residual weathering crust	
		гидролиза zone of hydrolysis	Тяжелая фракция: значительное количество ожелезненных агрегатов Fe-карб, P, Сф, Лк, Т, Ц, Г, псевдоморфозы ГО по П, Мгт, в незначительном количестве – П, Мгт, Гр, Ф. Легкая фракция: обожженные обломки Кв, Ал, Пс, минералы гр. ПШ Heavy fraction: R, Sph, Lk, T, C, G, pseudomorphs of iron hydroxides from P, in small amounts – P, Mgt, Gr, Ph. Au 0,1–0,01 mm – to 6 pieces, >0,1 mm – to 37 pieces. Light fraction: ferruginous pieces Q, Al, Ps, Fl, Cn, minerals of FS group
		гидратации zone of hydration	Тяжелая фракция: П (иногда с окисной пленкой), Мгт, Ф, в незначительных количествах – Т, Р, И, Ап, Ц, Fe-карб (часто ожелезненные), Г, псевдоморфозы ГО по П, минералы гр. Амф, Эп. Золото размерностью 0,1–0,01 мм – до 715 зн, >0,1 мм – до 920 зн. Легкая фракция: обожженные обломки Кв, Г-Д, Ал, Пс, минералы гр. ПШ Heavy fraction: P (sometimes with an oxide film), Mgt, Ph, in small amounts – T, R, I, Ap, C, Fe-carb (often ferruginous), G, pseudomorphs of iron hydroxides from P, minerals of Amf group, of Ep group. Au 0,1–0,01 mm – to 715 pieces, >0,1 mm – to 920 pieces. Light fraction: ferruginous pieces Q, G-D, Al, Ps, minerals of FS group
		дизинтеграции zone of disintegration	Тяжелая фракция: значительное количество П (часто окисленного) и Мгт, единичные псевдоморфозы ГО по П, Р, И, Ц, Т, Ал, Ф. Золото размерностью 0,1–0,01 мм – до 16 зн, >0,1 мм – до 3 зн. Легкая фракция: обломки Кв, Ал, Пс, Г-Д, минералы гр. ПШ Heavy fraction: a significant number of P (often oxidized) and Mgt, single pseudomorphs of iron hydroxides from P, R, I, C, T, Ap, Ph. Au 0,1–0,01 mm – to 16 pieces, >0,1 mm – to 3 pieces. Light fraction: pieces Q, Al, Ps, G-D, minerals of FS group

Кв – кварц, ПШ – полевые шпаты, Ал – алевриты, Пс – песчаники, Кр – кремни, Кн – конгломераты, Г-Д – габбро-долериты, Р – рутил, Сф – сфен, Лк – лейкоксен, Т – турмалин, Ц – циркон, Ф – фосфаты, Г – гетит, ГО – гидроокислы железа, П – пирит, Мгт – магнетит, Амф – амфиболы, Эп – эпидот, Пир – пироксены, И – ильменит, Ан – анатаз, зн – знаков, гр. – группа.

Q – quartz, FS – feldspar, Al – siltstones, Ps – sandstones, Fl – flint, Cn – conglomerates, G-D – gabbro-dolerites, R – rutile, Sph – sphene, Lk – leukoxene, T – tourmaline, C – circone, Ph – phosphates, G – goethite, Hi – hydroxides of iron, P – pyrite, Mgt – magnetite, Amf – amphiboles, Ep – epidote, Pir – pyroxenes, И – ilmenite, An – anatase, Sp – spinel, Kor – corundum, Gr – garnet, Ap – apatite, Fe-carb – ferruginous carbonates.

единичных зерен до значительных концентраций в тяжелой фракции минералов по направлению от зоны гидролиза к зоне дезинтеграции. Подобным образом ведет себя в остаточной коре и магнетит. По результатам химического анализа методом ИСП-масс-спектрометрии содержание золота в мо-

номинеральных фракциях интенсивно окисленного первичного пирита в зоне гидратации остаточной коры выветривания достигает 258 г/т, в монофракциях пирита, полностью замещенного гидроокислами железа в зоне дезинтеграции, содержание золота не превышает десятых долей г/т [21].

Практически повсеместно присутствуют сферические агрегаты железистых карбонатов различной степени ожелезнения, с наибольшей концентрацией в верхней части остаточной коры – в зоне гидролиза, с глубиной количество железистого карбоната снижается и в зоне дезинтеграции карбонат представлен кальцитом. По результатам химического анализа методом ИСП-масс-спектрометрии содержание золота в монофракции гипергенного железистого карбоната в зоне гидролиза остаточной коры выветривания достигает 0,778 г/т, в зонах гидратации и дезинтеграции содержание золота в карбонатах не превышает сотых долей процента [22].

Титановые минералы – ильменит и рутил – в верхней части остаточной коры выветривания (зона гидролиза) частично либо полностью замещаются лейкоксеном, в переотложенной коре выветривания присутствуют единичные зерна анатаза и сфен.

Минералы группы редкоземельных фосфатов, турмалин и циркон присутствуют во всех частях разреза. Присутствие апатита отмечается только в зонах гидратации и дезинтеграции остаточной коры выветривания.

Из породообразующих минералов в тяжелой фракции встречаются минералы группы амфиболов, пироксенов и эпидота, при этом они встречаются в нижней части остаточной коры и в переотложенной коре выветривания. Из породообразующих минералов в легкой фракции присутствует кварц, минералы группы полевых шпатов, эти минералы встречаются во всех зонах профиля коры выветривания.

Обломки пород в остаточной коре выветривания представлены песчаниками, алевритами, габбро-долеритами, в переотложенной коре выветривания дополнительно присутствуют кремни и конгломераты.

## Выводы

1. Установлено, что в Томь-Яйском междуречье коры выветривания очень широко развиты, они подразделяются на остаточные и переотложенные. Остаточные коры выветривания представлены линейным и площадным морфологическими типами.
2. Продукты выветривания представлены песчано-алевритовым, глинистым и щебнисто-дресвяным материалом, с преобладанием песчаной и алеврито-глинистой составляющей.
3. Корообразование, согласно значениям рассчитанных геохимических коэффициентов, происходило в обстановке гумидного климата. Остаточные коры выветривания имеют монтморил-

лонит-каолинит-гидрослюдистый состав. В строении полного профиля выделяются зоны: дезинтеграции, гидратации и гидролиза. В сокращенном профиле зоны гидратации и гидролиза могут отсутствовать.

4. Выявлена минералого-геохимическая зональность профиля выветривания, выражающаяся в закономерном изменении по разрезу количества и состава глинистых минералов, карбонатов, пирита, золота и других минералов.
  - В распределении глинистых минералов по зонам остаточной коры выветривания существует следующая тенденция – по мере перехода от зоны дезинтеграции к зоне гидролиза растет концентрация минералов группы каолинита, гидрослюд и снижается количество минералов группы монтмориллонита, а также кварца и полевых шпатов. Для переотложенной коры выветривания характерно значительное количество кварца, присутствие минералов группы каолинита, гидрослюд, в небольших количествах полевых шпатов, минералов группы монтмориллонита.
  - В пробах из переотложенной коры выветривания наблюдается наибольшее разнообразие минералов. Золото и многие минералы

переотложенной коры выветривания в различной степени окатаны. В остаточной коре выветривания акцессорные минералы отличаются заметным разнообразием лишь в зоне гидролиза, в зонах дезинтеграции и гидратации их общее количество невелико, при этом минералы тяжелой и легкой фракций не несут следов окатывания, золотины остаточной коры выветривания также имеют «рудный» облик.

- Из сульфидов в остаточной коре выветривания постоянно присутствует пирит, для которого характерна тенденция уменьшения содержания от значительных концентраций в зоне дезинтеграции до единичных зерен в зоне гидролиза остаточной коры выветривания.
- Практически повсеместно присутствуют сферические агрегаты железистых карбонатов, с наибольшей концентрацией в зоне гидролиза остаточной коры, с глубиной количество железистого карбоната снижается.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-700019) и в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парначев В.П., Парначев С.В. Геология и полезные ископаемые окрестностей города Томска. Материалы к полевой геологической экскурсии: справочное пособие. – Томск: ТГУ, 2010. – 144 с.
2. Черняев Е.В. Генезис и золотоносность кор выветривания Томского района // Цветные металлы и минералы: Сборник тезисов докладов восьмого международного конгресса. – Красноярск, 2016. – С. 336–337.
3. Интерпретация геохимических данных / Е.В. Скляров, Д.П. Гладкочуб, Т.В. Донская, А.В. Иванов, Е.Ф. Летникова, А.Т. Миронов, И.Г. Бараш, В.А. Буланов, А.И. Сизых / под ред. Е.В. Склярова. – М: Интернет Инжиниринг, 2001. – 288 с.
4. Геохимия рудных элементов в процессах выветривания, осадконакопления и катагенеза. Сборник научных трудов / под ред. В.М. Гавшина. – Новосибирск: Институт геологии и геофизики СО АН СССР, 1979. – 162 с.
5. Литолого-геохимические особенности отложений Усть-Одинского опорного разреза верхнего неоплейстоцена Иркутского амфитеатра Сибирской платформы / В.В. Иванова, А.А. Щетников, И.А. Филинов, С.В. Вещева, А.Ю. Казанский, Г.Г. Матасова // Литология и полезные ископаемые. – 2016. – № 3. – С. 215–232.
6. Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2005. – 289 с.
7. Мельничук О.Ю. Глинистые породы верхнедевонской кодинской свиты (Восточный склон Среднего Урала): Минералогия и химический состав, палеорекострукции // Ежегодник-2015. – Екатеринбург: Тр. ИГТ УрО РАН, 2016. – Вып. 163. – С. 51–57.
8. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 742 с.
9. Clift P.D., Wan Sh., Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: a review of competing proxies // Earth-Science Reviews. – 2014. – V. 130. – P. 86–102.
10. Попова Н.Н. Коры выветривания участка Каспа (Восточный Саян) и их минералогия // Инжиниринг&Технологии. – 2008. – Вып. 3. – № 1. – С. 234–246.
11. Heim D. Tone und Tonminerale. – Stuttgart: F.Enke, 1990. – 157 p.
12. Казанский Ю.П. Выветривание и его роль в осадконакоплении / под ред. В.П. Казаринова. – М: Наука, 1969. – 126 с.
13. Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. – Новосибирск: Гео, 2006. – 339 с.
14. Казаков П.В. Нетрадиционные типы экзогенных месторождений золота // Геологический сборник № 11. Информационные материалы. – Уфа: ДизайнПресс, 2014. – 256 с.
15. The dynamics of gold in regolith change with differing environmental conditions over time / R. Anand, M. Lintern, R. Hough, R. Noble, M. Verrall, W. Salama, J. Balkau, N. Radford // Geology. – 2017. – V. 45. – № 2. – P. 127–130.
16. Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison «Garimpo», Amazon, Brazil // Journal of South American Earth Sciences. – 2008. – V. 25. – P. 359–376.
17. Niggli P. Gesteine und Minerallagerstätten. Band 2. Exogene Gesteine und Minerallagerstätten. – Basel: Birkhäuser, 1952. – 557 s.
18. Schmitz M. Bedingungen, Prozesse und Stoffdynamik der Bildung tertiärer kaolinitischer Tonlagerstätten in Sachsen und Sachsen-Anhalt und deren Auswirkungen auf die anwendungstechnischen Eigenschaften der Rohstoffe. – Berlin: Technische Universität Berlin, 2008. – 277 s.
19. Nair N.G.K., Santosh M., Mahadevan R. Lateritisation as a possible contributor to gold placers in Nilambur Valley, Southwest India // Chem. Geol. – 1987. – V. 60. – № 1–4. – P. 309–315.
20. Biological and Geochemical Development of Placer Gold Deposits at Rich Hill, Arizona, USA / E.B. Melchiorre, P.M. Orwin,

- F. Reith, M.A.D. Rea, J. Yahn, R. Allison. – Minerals. – 2018. – V. 8. – Iss. 2. – P. 56–75.
21. Dating paleochannel iron ore by (U-Th)/He analysis of supergene goethite, Hamersley province, Australia / J.A. Heim, P.M. Vasconcelos, D.L. Schuster, K.A. Farley, G. Broadbent // Geology. – 2006. – V. 34. – P. 173–176.
22. Янченко О.М. Карбонаты золотоносных кор выветривания Малоушайской зоны // Проблемы геологии и освоения недр: тру-

ды XXI Международного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. – Томск, 3–7 апреля 2017. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Т. 1. – С. 193–194.

*Поступила 23.10.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Янченко О.М.**, аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ворошилов В.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

**Зианин М.**, PhD, доцент Шахрудского технологического университета.



UDC 553.411+551.311.231

## MINERAL-GEOCHEMICAL ZONALITY OF GOLDEN-BEARING WEATHERING CRUST OF THE TOM-YAYA INTERFLUVE

Olga M. Yanchenko<sup>1</sup>,  
olminayanchenko@mail.ru

Valery G. Voroshilov<sup>1</sup>,  
v\_g\_v@tpu.ru

Timofey V. Timkin<sup>1</sup>,  
timkin@tpu.ru

Mansour Ziaii<sup>2</sup>,  
m.ziaii47@gmail.com

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

<sup>2</sup> Shahrood University of Technology,  
Bolvar Daneshka, Shahrood, 361995161, Iran.

**The relevance.** Weathering crusts of the Tom-Yaya interfluvium can be the objects of commercial gold mining. Weathering crusts are widespread in the Tom-Yaya interfluvium, their gold content was established, but the structure, mineral composition and geochemical features have not been studied enough.

**The main aim** of the research is to identify mineral and geochemical zonation of weathering crusts of the Tom-Yaya interfluvium to solve the genesis issues and develop the criteria for predicting their gold content.

**Object:** weathering crusts on the rocks of the Paleozoic basement of the Tom-Yaya interfluvium.

**Methods.** Crystal morphological features of gold and satellite minerals, paragenetic associations with ore and vein minerals were analyzed microscopically under a binocular, in reflected light, chemical composition of minerals was studied by inductively coupled plasma-atomic emission mass spectrometry (ICP-AES/MS), X-ray fluorescence microscope HORIBA Scientific XGT-7200, on a scanning electron microscope TESCAN VEGA 3 SBU with EMF OXFORD X-Max 50. Reduced chemical composition of weathering products was determined by inductively coupled plasma-atomic emission mass spectrometry. Mineral composition of pelite fraction was determined by X-ray diffraction analysis using a D8 Advance diffractometer from Bruker. The authors have carried out the reduced particle size analysis of weathering products in different zones of the profile.

**Results.** The authors identified the residual and redeposited weathering crusts in the Tom-Yaya interfluvium. The weathering products are sandy-silty, clayey and gravelly-aggregate, with a predominance of sandy and silty-clayey constituents. The authors determined the composition and distribution of section clay minerals, carbonates, pyrite, gold and other minerals. Residual weathering crusts have montmorillonite-hydromica-kaolinite composition. In the structure of the complete profile, the following zones: 1) disintegration, 2) hydration and 3) hydrolysis, are distinguished. The mineral-geochemical characteristics of the isolated zones are given. Based on the abbreviated chemical analysis, the main geochemical modules were calculated.

### Key words:

Residual weathering crust, redeposited weathering crust, gold, mineral-geochemical zonation, Tom-Yaya interfluvium.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 18-45-700019.

### REFERENCES

1. Parnachev V.P., Parnachev S.V. Geologiya i poleznye iskopaemye okrestnostey goroda Tomsk [Geology and mineral resources around Tomsk]. *Materialy k polevoy geologicheskoy ekskursii: spravochnoe posobie* [Materials for the field geological excursion: reference book]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2010. 144 p.
2. Chernyaev E.V. Genesis i zolotonosnost kor vyvetrivanaya Tomskogo rayona [Genesis and mineralization of weathering mantle of Tomsk region]. *Tsvetnye metally i mineraly: sbornik tezisev dokladov vosmogo mezhdunarodnogo kongressa* [Non-ferrous metals and minerals: Book of abstracts of the eighth international congress]. Krasnoyarsk, 2016. pp. 336–337.
3. Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Letnikova E.F., Mironov A.T., Barash I.G., Bulanov V.A., Si-zykh A.I. *Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh* [Interpretation of geochemical data: Textbook. allowance]. Ed. by E.V. Sklyarov. Moscow, Internet Ingeniring Publ., 2001. 288 p.
4. *Geokhimiya rudnykh elementov v protsessakh vyvetrivanaya, osadkonakopleniya i katageneza. Sbornik nauchnykh trudov* [Geochemistry of ore elements in weathering, sedimentation and catagenesis. Collection of scientific papers]. Ed. by V.M. Gavshin. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1979. 162 p.
5. Ivanova V.V., Shetnikov A.A., Filinov I.A., Vesheva C.V., Kazanski A.Yu., Matasova G.G. Litologo-geokhimicheskie osobennosti otlozheniy Ust-Odinskogo opornogo razreza verkhnego neopleystotsena Irkutskogo amfiteatra Sibirskoy platformy [Litogeochemistry of rocks of the Upper Neopleistocene Ust-Oda reference section in the Irkutsk Amphitheater of the Siberian Platform]. *Lithology and minerals*, 2016, no. 3, pp. 179–194.
6. Maslov A.V. *Osadochnyye porody: metody izucheniya i interpretatsii poluchennykh dannykh* [Sedimentary rocks: methods for study

- dying and interpreting the data]. Ekaterinburg, UGGU Publ. house, 2005. 289 p.
7. Melnichuk O.Yu. *Glinistye porody verkhnedevonskoy kodinskoy svity (Vostochny sklon Srednego Urala): Mineralogiya i khimicheskiy sostav, paleorekonstruktsii* [Clay rocks of the Upper Devonian Kodin Formation (Eastern slope of the Middle Urals): Mineralogy and chemical composition, paleoreconstructions]. *Ezhegodnik-2015* [Yearbook 2015]. Yekaterinburg, Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016. Iss. 163, pp. 51–57.
  8. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimicheskie indikatory litogenyza (litologicheskaya geokhimiya)* [Geochemical Indicators of Lithogenesis]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 2011. 742 p.
  9. Clift P.D., Wan Sh., Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: a review of competing proxies. *Earth-Science Reviews*, 2014, vol. 130, pp. 86–102.
  10. Popova N.N. Kory vyvetrivaniya uchastka Kasp (Vostochny Sayan) i ikh minerageniya [Residual Soils of the Kasp Area (The Eastern Sayany) and their Minerageny]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technology*, 2008, Iss. 3, no. 1, pp. 234–246.
  11. Heim D. *Tone und Tonminerale*. Stuttgart, F. Enke, 1990. 157 p.
  12. Kazanskiy Yu.P. *Vyvetrivanie i ego rol v osadkonakoplenii* [Weathering and its role in sedimentation]. Ed. by V.P. Kazarinov. Moscow, Nauka Publ., 1969. 126 p.
  13. Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Prudnikov S.G. *Zolotonosnye kory vyvetrivaniya yuga Sibiri* [Gold-bearing weathering crust of the south of Siberia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. 339 p.
  14. Kazakov P.V., Kazakov P.V. Netraditsionnye tipy ekzogenykh mestorozhdeniy zolota [Non-traditional types of exogenous gold deposits]. *Geologicheskii sbornik № 11. Informatsionnyye materialy* [Geological collection № 11. Information materials]. Ufa, Design Press, 2014. 256 p.
  15. Anand R., Lintern M., Hough R., Noble R., Verrall M., Salama W., Balkau J., Radford N. The dynamics of gold in regolith change with differing environmental conditions over time. *Geology*, 2017, vol. 45, no. 2, pp. 127–130.
  16. Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison «Garimpo», Amazon, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2008, vol. 25, pp. 359–376.
  17. Niggli P. *Gesteine und Minerallagerstätten. Band 2. Exogene Gesteine und Minerallagerstätten* [Rocks and mineral deposits. Vol. 2. Exogenous rocks and mineral deposits]. Basel, Birkhauser, 1952. 557 p. In Ger.
  18. Schmitz M. *Bedingungen, Prozesse und Stoffdynamik der Bildung tertiärer kaolinitischer Tonlagerstätten in Sachsen und Sachsen-Anhalt und deren Auswirkungen auf die anwendungstechnischen Eigenschaften der Rohstoffe* [Conditions, processes and material dynamics of the formation of tertiary kaolinitic clay deposits in Saxony and Saxony-Anhalt and their effects on the application properties of the raw materials]. Berlin, Technical University Berlin, 2008. 277 p. In Ger.
  19. Nair N.G.K., Santosh M., Mahadevan R. Lateritisation as a possible contributor to gold placers in Nilambur Valley, Southwest India. *Chem. Geol.*, 1987, vol. 60, no. 1–4, pp. 309–315.
  20. Melchiorre E.B., Orwin P.M., Reith F., Rea M.A.D., Yahn J., Allison R. Biological and Geochemical Development of Placer Gold Deposits at Rich Hill, Arizona, USA. *Minerals*, 2018, vol. 8, Iss. 2, pp. 56–75.
  21. Heim J.A., Vasconcelos P.M., Schuster D.L., Farley K.A., Broadbent G. Dating paleochannel iron ore by (U-Th)/He analysis of supergene goethite, Hamersley province, Australia. *Geology*, 2006, vol. 34, pp. 173–176.
  22. Yanchenko O.M. Karbonaty zolotonosnykh kor vyvetrivaniya Maloushayskoy zony [Carbonates of gold-bearing weathering crusts of the Maloushayskaya zone]. *Problemy geologii i osvoiniya nedr. Trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina* [Problems of geology and subsoil development. Proc. of the 21<sup>st</sup> International Symposium of Academician M.A. Usov, students and young scientists, dedicated to the 130<sup>th</sup> anniversary of the birth of Professor M.I. Kuchin]. Tomsk, April 3–7 2017. Tomsk, TPU Publ. house, 2017. Vol. 1, pp. 193–194.

Received: 23 October 2018.

#### Information about the authors

**Olga M. Yanchenko**, postgraduate student, National Research Tomsk State University.

**Valery G. Voroshilov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Timofey V. Timkin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Mansour Ziaii**, PhD, associate professor, Shahrood University of Technology.

УДК 546:650.161.185

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОНАЦИТА И БИФТОРИДА АММОНИЯ

**Муслимова Александра Валерьевна<sup>1</sup>,**  
klameri7@gmail.com

**Буйновский Александр Сергеевич<sup>1</sup>,**  
ASBujnovskij@mephi.ru

**Молоков Петр Борисович<sup>1</sup>,**  
PBMolokov@mephi.ru

**Софронов Владимир Леонидович<sup>1</sup>,**  
VLSofronov@mephi.ru

<sup>1</sup> Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65.

Новейшие технологии, которые обеспечивают научно-технический прогресс, опираются на уникальные свойства редкоземельных металлов и их соединений. В последние годы предприняты попытки по возрождению производства редкоземельных металлов в России, в основном за счет источников, из которых редкоземельные элементы можно извлекать попутно (апатитов, фосфоритов и продуктов их переработки). Еще один источник редкоземельных элементов, представляющий собой готовый концентрат, – монацитовый концентрат, хранящийся на складе государственного казенного учреждения Свердловской области «Урал-Монацит» в г. Красноуфимске. Известные промышленные технологии (щелочная и сернокислотная) переработки монацита имеют ряд недостатков, в частности неполноту выделения редкоземельных элементов и сложность отделения тория от редкоземельных элементов, поэтому работы по совершенствованию технологий переработки монацитового сырья с извлечением из него концентрата редкоземельных элементов с очисткой от примесей, в том числе тория, являются актуальными. Для эффективного разложения трудновскрываемой кристаллической решетки монацита предложено его фторирование при помощи гидрофторида аммония, как относительно экологичного и регенерируемого реагента.

**Цель:** исследовать процесс и установить особенности взаимодействия монацитового концентрата с бифторидом аммония с получением продукта, пригодного для дальнейшей сернокислотной переработки.

**Объект:** образец партии монацитового концентрата базы хранения ГКУ СО «УралМонацит».

**Методы:** атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой, рентгенофлуоресцентный анализ, нейтронно-активационный анализ, рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия с микроанализом, метод совмещенного термогравиметрического/дифференциально-термогравиметрического/дифференциально-сканирующего калориметрического анализа.

**Результаты.** Рассмотрена первая стадия предложенной фтораммонийно-сернокислотной переработки монацитовых концентратов – стадия гидрофторирования. При взаимодействии монацитового концентрата с бифторидом аммония в первую очередь в реакцию вступают примеси, содержащиеся в концентрате, образуя соответствующие фториды и фтораммонийные соединения, и лишь потом фосфаты редкоземельных металлов. Выделяющаяся при этом фосфорная кислота взаимодействует с бифторидом аммония с образованием гидрофосфатов аммония и незначительным выделением фосфора в газообразную фазу. Это подтверждается результатами исследований, проведенных в интервале температур 170–250 °С: 49,2–83,3 % фосфора при фторировании остается в твердой фазе, в жидкую переходит 12,0–32,8 %, в газообразную – от 11,2 до 28,1 %. На полученных ТГА- и ДСК-кривых при дальнейшем увеличении температуры вплоть до 500 °С отсутствуют признаки протекания реакций, что позволяет говорить о том, что полная отгонка фосфора из продуктов фторирования в изученном интервале температур невозможна. По материальному балансу 10,4–38,4 % кремния переходит в газовую фазу в виде SiF<sub>4</sub>, 55,3–75,9 % – в раствор выщелачивания в виде растворимого (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, который может быть разложен до газообразного SiF<sub>4</sub> при дальнейшей кислотной переработке. На основании полученных результатов выбраны оптимальные условия для проведения процесса фторирования монацитового концентрата гидрофторидом аммония: температура 210 °С; содержание бифторида аммония 80 % от стехиометрии; продолжительность процесса 1,5 часа.

### Ключевые слова:

Монацит, монацитовый концентрат, гидрофторид аммония, бифторид аммония, редкоземельные элементы, торий, кремний, фосфор.

### Введение

Монацит – минерал, являющийся ценным источником редкоземельных элементов (РЗЭ) и тория. Промышленно освоенными методами его переработки являются сернокислотный и щелочной. Большое количество публикаций посвящено усовершенствованию сернокислотной [1–3] или щелочной технологий переработки монацита [4, 5], также в литературе рассматривается применимость таких методов, как бактериологическое вы-

щелачивание [6], сульфатизация и пиролиз до 800 °С [7], автоклавное азотнокислотное выщелачивание [8, 9], сверхкритическая флюидная экстракция [10] и других.

В г. Красноуфимске на Урале (Свердловская обл.) хранится около 80 тысяч тонн монацита из 800 различных партий. Наиболее обширные исследования состава различных партий этого монацитового концентрата (МК) приведены в работах [11, 12] на примере 34 партий. Содержание мона-

цита в концентратах оценено от 78 до 100 %, авторами также предложена предварительная классификация этих материалов: на основании данных об их химическом составе, по окраске, степени прозрачности, форме зерен [12].

Для монацита в целом характерна высокая взаимная растворимость и широкий изоморфизм с хаттонитом ( $\text{ThSiO}_4$ ) [13]. Из этого можно сделать вывод о вероятной нецелесообразности применения основных промышленных методов переработки монацита. При щелочной переработке из-за невысокого и непостоянного качества МК увеличивается расход достаточно дорогого вскрывающего агента на разложение балластных примесей. Присутствие в части партий МК вростков минералов-силикатов повлечет снижение степени извлечения РЗЭ при кислотной переработке.

Основной метод удаления кремния из силикатных или кремнийсодержащих матриц минералов заключается во фторировании таких материалов с удалением кремния в виде летучего  $\text{SiF}_4$ , что часто используется в пробоподготовке в совокупности с эффективным разрушением кристаллической решетки труднорастворимых материалов под действием фторирующих агентов [14, 15]. В случае фторирования монацита образуются фториды РЗЭ, тория, примесей, что усложняет процесс очистки и разделения полученных соединений из-за низкой растворимости фторидов РЗЭ и тория по сравнению с другими схемами переработки.

Известен метод отгонки фторидов из растворов нелетучих кислот, в частности  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , который хорошо зарекомендовал себя в пробоподготовке для разложения трудновскрываемых проб горных пород, силикатов, а также других проб, содержащих кремний или кремниевую кислоту, для разрушения прочных фторидных комплексов металлов [16]. Предположительно, применение фторирования при переработке монацита в случае эффективной конверсии полученных фторидов редкоземельных металлов (РЗМ) в сульфаты позволит увеличить выход РЗЭ по сравнению с классической серно-кислотной переработкой.

Данный метод был рассмотрен в работах [17–19]: предложено проводить фторирование монацита в смеси фторида аммония и серной кислоты при 260 °С, а затем при 340 °С производить отгонку фтора из образовавшихся фторидов с переводом их в сульфатные соединения. При этом в источниках приведены противоречивые сведения о поведении фосфора в процессе фторирования фосфатных минералов фтораммонийными соединениями: в работе [19] указано, что при нагреве смеси монацита, фторида аммония и серной кислоты до 340 °С значительная часть фосфора переходит в газообразную фазу в виде  $\text{PF}_5$ ; а в работе [20] при термогравиметрическом исследовании взаимодействия бифторида аммония (БФА) и апатита авторами было обнаружено, что при 320 °С в газовую фазу выделяется лишь около 10 % фосфора в виде  $\text{POF}_3$ , при дальнейшем нагреве до 800 °С это значение не пре-

вышает 65 %. Поведение фосфора в процессе переработки МК имеет важное значение, так как его содержание в концентратах в среднем оценивается в 22,2 мас. % (на  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) [11], и в связи с этим велико влияние на технологический процесс выделения РЗЭ.

Возможность отделения от РЗЭ при фторировании монацита ряда примесей, в частности кремния и фосфора, значительно упрощает дальнейшую переработку растворов выщелачивания сульфатов. Предложенные в работах [17–19] условия и стадийность фтораммонийно-серно-кислотной переработки имеют ряд недостатков: состав газовой фазы усложняет ее очистку и выделение БФА для рециклинга, увеличивается расход фторида аммония на реакцию с серной кислотой, из-за необходимости применения избытка реагентов продукты образуют спеки, что повышает продолжительность процесса удаления летучих продуктов разложения и усложняет стадию следующего выщелачивания ценных компонентов.

Для устранения указанных недостатков было предложено разделить стадии фторирования МК БФА и сульфатизации получаемого продукта. В связи с этим были проведены исследования по изучению вещественного и химического состава исходного сырья, установлению его особенностей, а также исследование процесса взаимодействия МК с БФА с целью получения продукта, пригодного для дальнейшей кислотной переработки.

#### Методика анализа объекта исследований

Для проведения исследований были отобраны две технологические пробы (проба I и проба II), различающиеся по внешнему виду (цвету), от партий монацитового концентрата со складов ГКУ СО «УралМонацит».

Исходный МК подвергли ситовому анализу при помощи аналитической просеивающей машины AS 200 («RETSCH GmbH», Германия) методом сухого рассева. Масса исходной навески для отсева 500 г.

Предварительную оценку химического состава МК проводили методом РФА при помощи волнодисперсионного спектрометра «Спекроскан МАКС-GVM». В качестве образцов сравнения использовали таблетки, полученные прессованием порошка из смеси точно отобранных навесок оксидов определяемых элементов (ос.ч.) с содержанием по основному веществу не менее 99,0 мас. %. Количественную оценку химического состава МК проводили методами нейтронно-активационного анализа (НАА) (ЯР ТПУ, г. Томск) и атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) на приборе iCAP-6200. Растворение проб для АЭС проводили с использованием микроволновой системы MARS 6. Для построения градуировочных графиков использовали аттестованные многоэлементные стандартные растворы МЭС-1, МЭС-2, МЭС-3, МЭС-4 и МЭС-РЗЭ (ООО «НПП Скат», г. Новосибирск), а также растворы нитратов тория и урана ( $[\text{Th}] = 0,5 \text{ г/дм}^3$ ,



[U]=0,5 г/дм<sup>3</sup>). В качестве внутреннего стандарта использовали азотнокислотный раствор кадмия.

Шлифы зерен МК исследованы методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе «Hitachi S-3400N» (ТПУ, г. Томск), получены карты распределения ряда элементов по поверхности шлифа и энергодисперсионные спектры в точках.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 с идентификацией фаз по картотеке JCPDS. Параметры съемки: длина волны характеристического излучения  $\lambda(\text{CuK}\alpha)=0,154$  нм; экспозиция 0,5 с; диапазон измерения углов дифракции ( $2\theta$ ) – 10–98 град; скорость изменения углов  $2\theta$  в процессе съемки – 0,5 град/мин.

#### Характеристика объекта исследования

По результатам определения гранулометрического состава концентрата получили, что основная фракция (49,2 %) относится к классу крупности (+0,16)...(–0,315) мм, суммарно 79,8 % – к классу крупности (+0,16)...(–0,5) мм. Выход во фракцию (–0,1) мм составил 0,9 %, во фракцию (+1) мм – 0,6 %; выход концентрата по другим фракциям, а также интегральный выход представлены на рис. 1.

Результаты исследований химического состава МК представлены графически на рис. 2. Содержание оксидов РЗЭ варьируется от 41,00 до 43,89 мас. %,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 19,92–20,67 мас. %,  $\text{SiO}_2$  – 3,14–3,36 мас. %,  $\text{ThO}_2$  – 5,88–6,11 мас. %,  $\text{U}_3\text{O}_8$  0,16–0,28 мас. %. Химический состав проб I и II близок, расхождения в содержании железа, титана и ниобия связаны, судя по всему, с разным составом примесных минералов в пробах концентрата. Расхождения между результатами АЭС и НАА заметны для некоторых оксидов РЗЭ ( $\text{Pr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tb}_2\text{O}_3$ ) и, вероятно, связаны с влияниями на аналитические линии присутствия в пробе урана и железа.

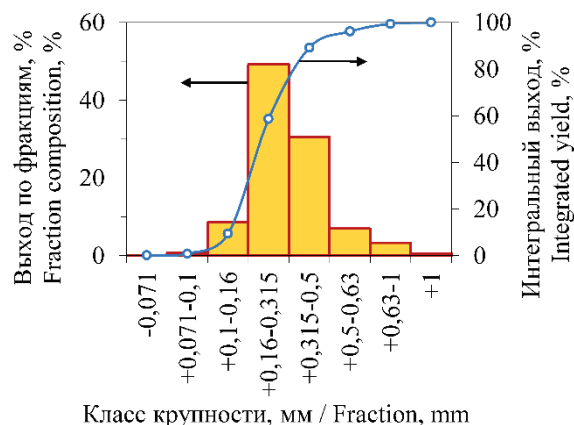


Рис. 1. Выход по фракциям и интегральная кривая гранулометрического состава исследуемого образца МК

Fig. 1. Fraction composition and integral curve of the granulometric composition of the monazite concentrate sample

Исследование участка зерна МК с использованием СЭМ (рис. 3) показало, что пространственное распределение основных компонентов МК по поверхности относительно равномерное. Это позволяет достаточно уверенно говорить о том, что торий, уран и продукт их распада Pb входят в кристаллическую решетку монацита и находятся в изоморфной форме. В то же время в ряде участков наблюдается неоднородность в распределении Th, Si, Ca (рис. 3, б–г). Это позволяет предположить присутствие в зернах монацита хаттонита и чералита (Th, Ca, Ce) ( $\text{PO}_4$ ,  $\text{SiO}_4$ ), что является характерной особенностью монацита вследствие широкого изоморфизма с указанными минералами. Спектр, снятый с участка с однородным распределением исследованных элементов (рис. 4, спектр 1), в целом соответствует типичному спек-

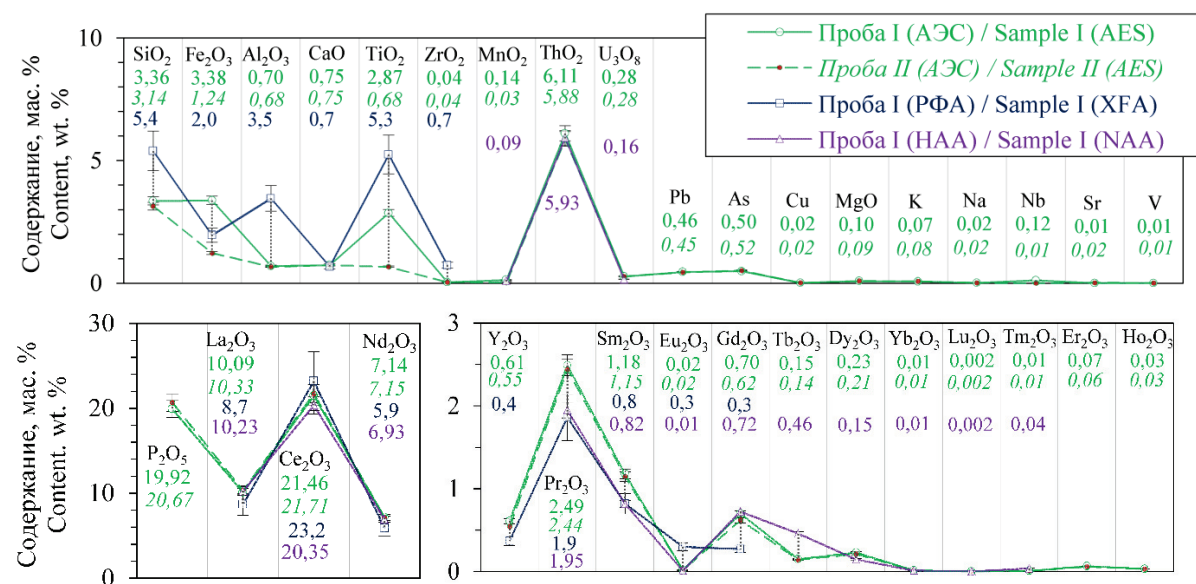


Рис. 2. Результаты химического анализа МК (в легенде в скобках рядом с номером пробы указан метод анализа, также введены цветные обозначения, соответствующие цифровым данным, нанесенным на графики)

Fig. 2. Results of chemical analysis of monazite concentrate (in the legend, the method of analysis is indicated in parentheses next to the sample number, color symbols are also introduced corresponding to the digital data plotted on the graphs)

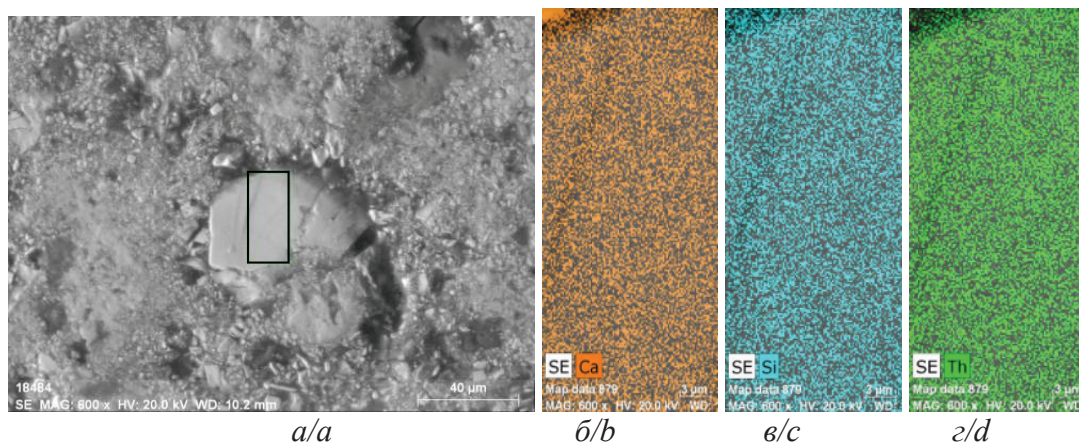


Рис. 3. Распределение кальция, кремния и тория на выделенном участке зерна монацита: а) SE-изображение исходного зерна с указанием области сканирования; б) распределение по области сканирования кальция, в) кремния, г) тория

Fig. 3. Distribution of calcium, silicon and thorium on the isolated area of monazite grain: а) SE-image of the initial grain with indication of the scanning area; б) distribution along the scanning area of calcium, в) silicon, г) thorium

тру монацита. В спектре, снятом с участка с неоднородным распределением элементов (рис. 4, спектр 2), обнаружены большие содержания кальция, кремния, железа.

По результатам исследований фазового состава данной пробы определено присутствие основных компонентов монацита – фосфатов РЗЭ моноклинной сингонии (церия и лантана, карточки JCPDS № 32–199 и № 35–731), а также ортосиликата тория моноклинной сингонии (№ 4–613) и диортосиликата неодима с орторомбической кристаллической решеткой (№ 26–1276). Это подтверждает присутствие в образце монацита вростков хаттонита, а также показывает, что с силикатной фазой также связана часть РЗЭ, в частности неодим. Таким образом, на основании классификации, предложенной в [2], исследуемую пробу МК можно отнести к типу Монацит-1, для которого характерны вросстки хаттонита и чералита.

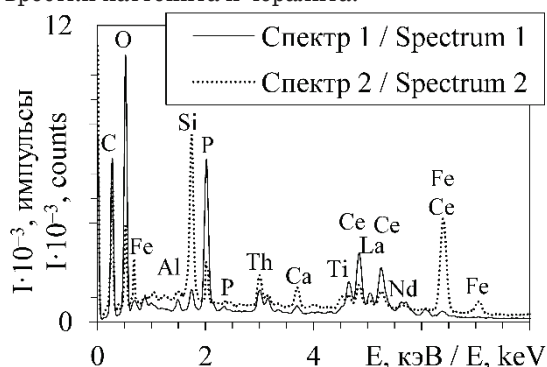


Рис. 4. Спектры, снятые с областей однородного (спектр 1) и неоднородного (спектр 2) распределения элементов по зерну монацита

Fig. 4. Spectra taken from regions of homogeneous (spectrum 1) and inhomogeneous (spectrum 2) distribution of elements along the grain of monazite

Следует отметить, что при кислотной переработке концентратов, содержащих кремний, воз-

можно образование гелей и коллоидов кремнекислоты, что может значительно осложнять стадии фильтрации или центрифугирования. Тесное вращение хаттонита в монацит и связывание части РЗЭ в силикаты при кислотной переработке приведет к снижению выхода РЗЭ, поэтому для удаления из концентрата кремния, а также разрушения матрицы самого монацита перед кислотной переработкой провели исследования по взаимодействию БФА с МК.

#### Методика экспериментальных исследований

Гидрофторирование проводили, помещая в стеклокюглеродный тигель объемом 50 см<sup>3</sup> навески измельченного БФА (ч.) и МК исходной крупности и перемешивая. Тигель выдерживали заданное время в муфельной печи, заранее нагретой до температуры эксперимента. Провели три серии экспериментов:

- продолжительность процесса  $\tau=(1,0;1,5;2,0;2,5)$  часов при количестве БФА от стехиометрически необходимого  $\nu=110\%$  и температуре  $t=230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- $\nu=(80,90,100,110,120)\%$  при  $t=230\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\tau=2,5$  часа;
- $t=(170,190,210,230,250)\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $\tau=2,5$  часа и  $\nu=110\%$  от стехиометрического.

Расчет стехиометрически необходимого количества БФА вели, полагая, что при фторировании фосфатов РЗЭ, тория и иттрия образуются соответствующие фториды, фосфорная кислота, фтороводород и аммиак, а при фторировании оксидов примесей – фториды кальция, магния, урана и фтораммонийные соединения железа, алюминия, кремния, титана, циркония, а также аммиак и вода. Таким образом на 1,0 г МК необходимо взять 1,0 г БФА.

К полученному продукту фторирования добавляли дистиллированную воду в расчете 1 г исходного концентрата: 10 см<sup>3</sup> воды и проводили выще-

лачивание в течение 30 минут при перемешивании и нагреве до 50 °С для удаления непрореагировавшего БФА и растворимых продуктов фторирования. После фильтрации раствор анализировали методом АЭС по методике, описанной ранее. Степени извлечения элементов ( $\alpha$ ) рассчитывали как отношение массы элемента, перешедшего в раствор, к массе элемента в исходном МК, выраженное в процентах.

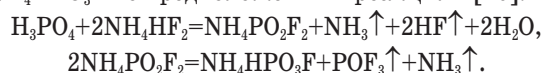
Высушенные и истертые до прохождения через сито с размером ячейки 0,1 мм образцы нерастворенных остатков (н.о.) прессовали в таблетки с подложкой из борной кислоты при помощи пресса ПЛГ-20 при усилии 7 тонн и проводили РФА, используя метод фундаментальных параметров, при помощи волнодисперсионного спектрометра «Спекроскан МАКС-GVM» и энергодисперсионной приставки Oxford Instruments INCA X-Act для определения содержания фтора. В качестве эталонов были использованы смеси монацита известного состава проб I и II, определенного методом АЭС, с фторидом натрия и фторидом неодима. Расхождения в содержании элементов, образующих нерастворимые соединения (Ca, La), с расчетным содержанием не превышали 10 отн. %. Термогравиметрическое взаимодействие МК и БФА проводили на приборе SDT Q600 при условиях: масса навески 10,0 мг, нагрев до 650 °С со скоростью 5 °/мин в атмосфере аргона, материал тигля  $Al_2O_3$ . Шихту готовили истиранием смеси в агатовой ступке при массовом соотношении МК: БФА=1:1. Рентгенофазовый анализ образца продукта гидрофторирования МК проводили на дифрактометре ARL X'TRA, идентификацию фаз по базе данных ICDD PDF-2. Параметры съемки:  $\lambda(CuK\alpha)=0,1518$  нм;  $2\theta=10-60^\circ$ ; экспозиция 2,4 с; скорость изменения углов  $2\theta$  в процессе съемки – 0,3 °/мин. Поверхность частиц порошка продукта гидрофторирования МК исследовали методом СЭМ на приборе Vega 3 SBH (Tescan). Для получения карт распределения использовали вышеуказанную приставку X-Act.

## Результаты

На рис. 5, а, приведены ТГ- и ДТГ-кривые, на рис. 5, б, – ДСК-кривая процесса взаимодействия МК и БФА.

Компоненты шихты начинают вступать во взаимодействие уже при комнатной температуре при истирании, что видно по потере массы при 30 °С на ДТГ-кривой. Взаимодействие минералов-примесей концентрата с БФА начинается при 50 °С, то есть еще до его расплавления (эндозффект при 121 °С), и достигает максимальной скорости при 176 °С. При этом образуются двойные соли железа, алюминия, титана, кремния (например,  $(NH_4)_3FeF_6 \cdot nNH_4F$  [21]). На этот процесс налагается процесс разложения БФА с максимумом при 186 °С. Процесс с максимумом при 203 °С, видимо, отвечает разложению образованных ранее двойных солей.

Максимум на ДТГ-кривой при 217 °С соответствует взаимодействию монацита и БФА с выделением фосфорной кислоты, при 257 °С – взаимодействию фосфорной кислоты с БФА с образованием  $NH_4HPO_3F$  по предположенным реакциям [20]:



При температуре 549 °С, по-видимому, по аналогии с предложенной стадийностью в работе [20], происходит взаимодействие образованных фторидов металлов с гидромонофторфосфатом аммония с образованием фторфосфатов. Связывание фосфора в нерастворимые соединения при нагреве пробы до 600 °С подтверждается тем, что при выщелачивании спека после ТГ-анализа степень извлечения фосфора в раствор составила лишь 2,3 % относительно его содержания в исходном МК. Следует отметить, что при термогравиметрических исследованиях положения максимумов зависят от выбранной скорости нагрева и могут быть использованы для оценки стадийности процесса, но не могут быть перенесены на исследования взаимодей-

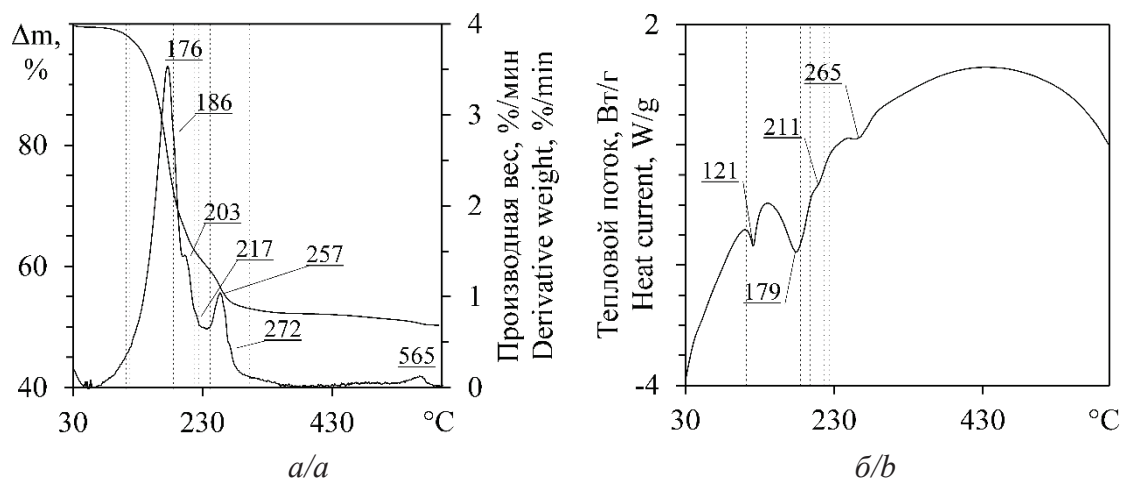


Рис. 5. ТГ-, ДТГ- (а), ДСК-кривые (б) взаимодействия монацитового концентрата с БФА

Fig. 5. TG-, DTG- (a), DSC-curves (b) of monazite concentrate interaction with ammonium bifluoride



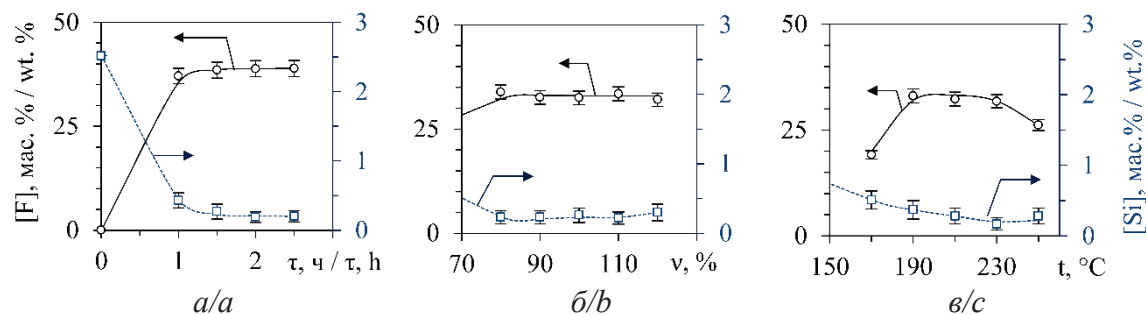


Рис. 6. Графики зависимости содержания фтора и кремния в продуктах фторирования после их выщелачивания при: а) различной продолжительности процесса, б) разном количестве БФА от стехиометрически необходимого, в) различной температуре

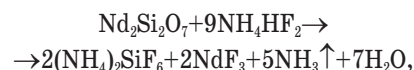
Fig. 6. Graphs of dependence of fluorine and silicon content in fluorination products after leaching at different: a) process duration, b) amounts of ammonium bifluoride from stoichiometrically necessary, c) temperatures

ствий при изотермических условиях, когда происходит наложение процессов друг на друга. В связи с этим для определения оптимальной температуры фторирования МК БФА проведены исследования в изотермических условиях.

На рис. 6 показаны результаты исследования влияния ряда факторов на содержание в продуктах фторирования фтора и кремния. Наибольшее содержание фтора в продуктах фторирования МК БФА получено в экспериментах с разной продолжительностью процесса (рис. 6, а): увеличение продолжительности фторирования более 1,0–1,5 ч практически не влияет на содержание фтора в продуктах фторирования. Также мало влияние количества БФА, использованного для фторирования, в интервале (80–120) % от стехиометрически необходимого (рис. 6, б). С увеличением температуры процесса с 170 до 190 °C (рис. 6, в) происходит увеличение содержания фтора в продуктах фторирования МК, в интервале температур 190–230 °C содержание фтора практически не изменяется, дальнейшее увеличение температуры до 250 °C приводит к снижению содержания фтора в продукте. Таким образом, можно предположить, что температура 170 °C является недостаточной для интенсификации процесса, а при температурах выше 230 °C происходит частичное разложение БФА.

Также видно, что во всех экспериментах наблюдалось снижение содержания в продуктах фторирования кремния (до 0,17–0,51 мас. %, рис. 6) по сравнению с его содержанием в исходном концентрате. Содержание кремния в твердой фазе уменьшается с увеличением температуры, достигая минимальных значений при 210–230 °C, и далее изменяется незначительно. При увеличении продолжительности процесса фторирования с 1,5 до 2,0 часов при 230 °C происходит снижение содержания кремния с 0,28 до 0,20 мас. %, до 2,5 часов – содержание кремния остается практически неизменным. В связи незначительными изменениями содержания фтора и кремния в продуктах фторирования после 1,5 часов данная продолжительность процесса выбрана в качестве оптимальной.

Также незначительное влияние на содержание кремния в продуктах фторирования оказывает разное количество БФА, что связано с тем, что кремнийсодержащие соединения реагируют с БФА в первую очередь. При фторировании кремнийсодержащей части концентрата образуется хорошо растворимый фторсиликат аммония:



который возгоняется в газообразную фазу при температурах более 300 °C. Поэтому в растворах выщелачивания продуктов фторирования МК определяли содержание кремния и ряда элементов, образующих при фторировании растворимые соединения. Влияние выбранных факторов на степени извлечения некоторых элементов приведено на рис. 7.

Из представленных на рис. 7, а, данных видно, что в интервале температур 170–210 °C с увеличением температуры степени извлечения растворимых фтоаммонийных соединений алюминия, титана и кремния изменяются незначительно, при дальнейшем повышении температуры наблюдается понижение степеней извлечения указанных соединений, что может быть связано с разложением и потерей фторировующего агента. В связи с этим в качестве оптимальной температуры процесса выбрана температура 210 °C. Для железа степень извлечения резко снижается при увеличении температуры с 170 до 210 °C, что свидетельствует об образовании при 210 °C менее растворимого соединения.

Из данных, приведенных на рис. 7, б, видно, что извлечение титана, алюминия, железа и фосфора в раствор в основном мало изменяется при варьировании от 80 до 120 % от стехиометрически необходимого количества используемого БФА. Также мало изменяются степени извлечения фосфора и железа, а степень извлечения кремния в раствор снижается при использовании избытка



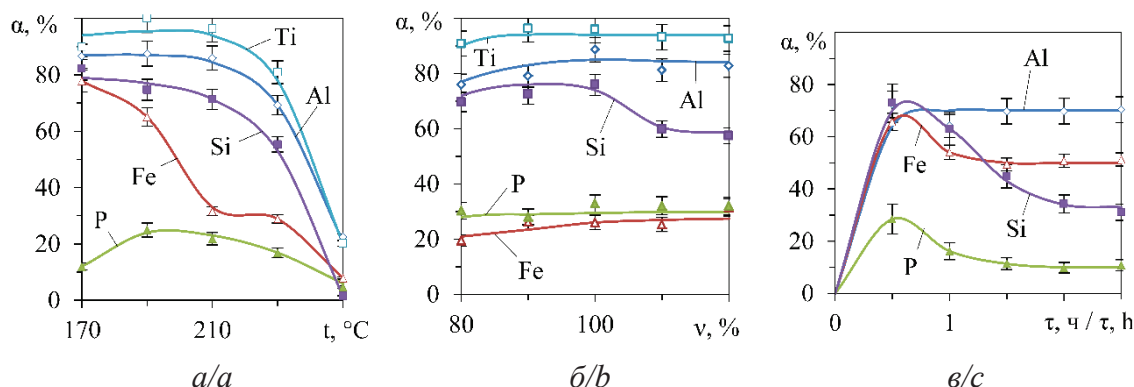


Рис. 7. Графики зависимости степеней извлечения некоторых элементов из продуктов фторирования при: а) различной температуре, б) разном количестве БФА от стехиометрически необходимого, в) различной продолжительности процесса

Fig. 7. Graphs of dependence of the extraction degrees of some elements from fluorination products at different: a) temperatures, b) amounts of ammonium bifluoride from the stoichiometrically necessary, c) process duration

БФА. При недостатке реагентов получаемые продукты после охлаждения имели порошкообразный вид либо являлись легкоизмельчаемыми спеками. С увеличением количества БФА спекы труднее поддавались измельчению, но получить легкоизмельчаемый продукт можно было, увеличив по окончании эксперимента температуру в печи до 250 °С и выдержав его в течение 1,0 часа. Целью гидрофторирования являлось не полное фторирование концентрата, а частичное разрушение кристаллической решетки монацита и выделение во фториды металлов, связанных с кремнием, перед дальнейшей сернокислотной переработкой, поэтому применение недостатка БФА предпочтительнее как с экономической точки зрения, так и с технологической: получение порошкообразного или легкоизмельчаемого материала повышает выход целевых продуктов и снижает вероятность забивки штуцеров аппарата фторирования и вывода его из строя. В качестве оптимального выбрано количество БФА, равное 80 % от стехиометрически необходимого.

Степень извлечения кремния с увеличением продолжительности процесса с 0,5 до 2,5 часов

уменьшается с 72,9 до 31,1 %, что в совокупности с данными, представленными на рис. 6, а, происходит за счет перехода кремния в газообразную фазу в виде  $\text{SiF}_4$ . Обращает на себя внимание то, что зависимости степени извлечения железа и фосфора от продолжительности процесса фторирования имеют схожий характер: при фторировании в течение 0,5–1,5 часов они снижаются (для железа с 65,7 до 49,4 %, для фосфора с 28,5 до 11,4 %), после чего изменяются незначительно. Степень извлечения алюминия практически не изменяется при увеличении продолжительности фторирования (рис. 7, в), оставаясь во всем исследованном интервале времени на уровне 70 %.

По полученным данным составили материальные балансы процесса фторирования по фосфору и кремнию, приведенные на рис. 8, 9. Переход в газообразную фазу определяли расчетно, по разнице между содержанием в исходном МК и содержанием в растворе выщелачивания и н.о.; при этом предполагали, что разница менее 10 % связана с использованием разных методов анализа жидкой и твердой фаз, а более 10 % – переходом в газообразную фазу.

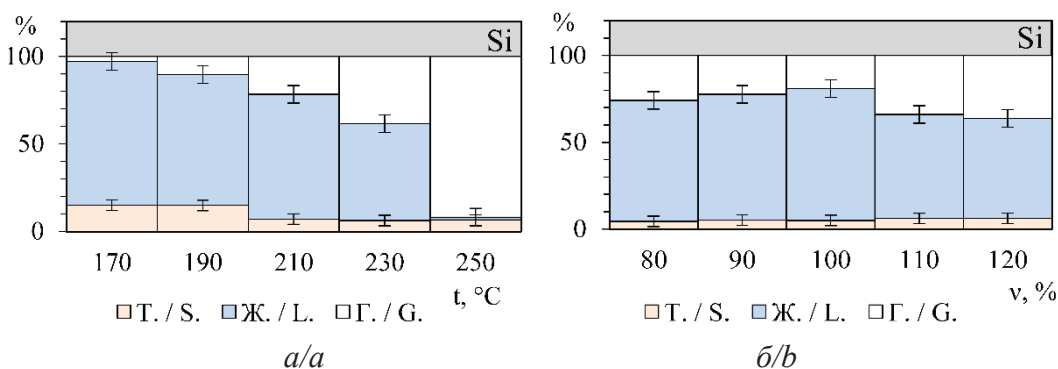


Рис. 8. Материальный баланс процесса фторирования МК по кремнию при: а) различной температуре, б) разном количестве БФА от стехиометрически необходимого (Т. – обозначение твердой фазы, Ж. – жидкой, Г. – газообразной)

Fig. 8. Material balance of the monazite concentrate fluorination with respect to silicon at different: a) temperatures, b) amounts of ammonium bifluoride from stoichiometrically necessary (S. – solid, L. – liquid, G. – gaseous phase)

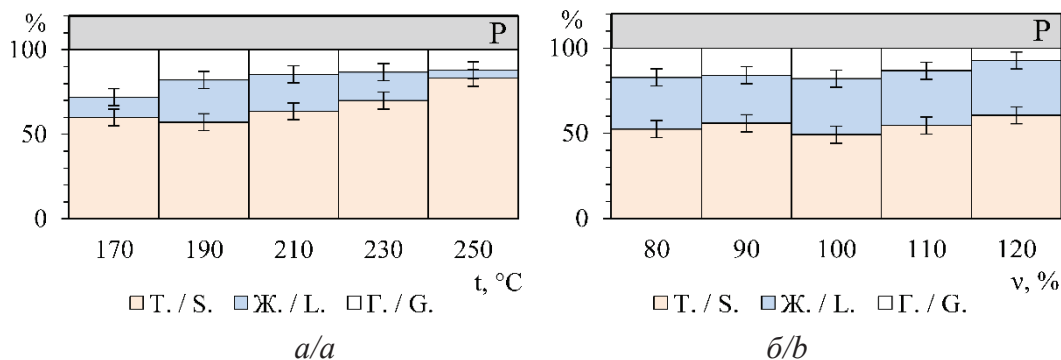
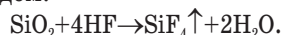


Рис. 9. Материальный баланс процесса фторирования МК по фосфору при: а) различной температуре, б) разном количестве БФА от стехиометрически необходимого

Fig. 9. Material balance of the monazite concentrate fluorination by phosphorus at different: a) temperatures, b) amounts of ammonium bifluoride from stoichiometrically necessary

Материальный баланс по кремнию подтверждает сделанные ранее выводы: 10,4–38,4 % кремния (от его содержания в исходном концентрате, далее опускается) переходит в газовую фазу в виде  $\text{SiF}_4$ , 55,3–75,9 % представлены растворимым  $(\text{NH}_4)_3\text{SiF}_6$ , до 14,9 % остается в твердой фазе в виде исходных кремнийсодержащих минералов. Наиболее существенное отличие от указанных диапазонов наблюдается для температуры 170 °C, при которой кремний распределяется между твердой и жидкой фазами в соотношении 15,0:82,2 %, и для температуры 250 °C, при которой кремний на 91,9 % переходит в газообразную фазу. Переход кремния в газообразную фазу можно объяснить взаимодействием кремнийсодержащей части концентрата с выделяющимися при разложении БФА или при взаимодействии БФА с фосфатами РЗЭ фтороводородом:



Из приведенных на рис. 9 данных видно, что при фторировании часть фосфора остается в твердой фазе (49,2–83,3 %), в жидкую переходит 12,0–32,8 %, в газообразную – 11,2–28,1 %. Ранее (рис. 6, в) было показано, что в интервале температур 190–230 °C содержание фтора в твердых продуктах фторирования достаточно высоко, что можно связать с полной разрушения кристаллической решетки монацита. При этом в газовую фазу фосфор может уходить в виде  $\text{POF}_3$ , в жидкую – в виде фторфосфатов аммония или фосфорных кислот, в твердой – частично оставаться в составе непрореагировавшего монацита, а частично образовывать нерастворимые фосфаты или пирофосфаты.

Для подтверждения данного предположения провели рентгенофазовый анализ для образца продукта фторирования МК, полученного при условиях: 230 °C, 2 ч, 90 % БФА от стехиометрически

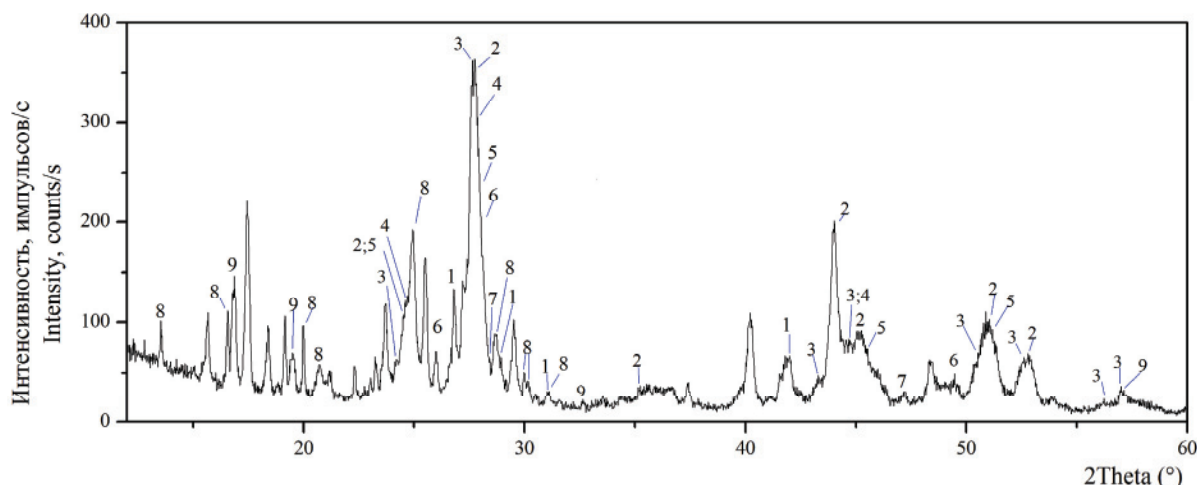


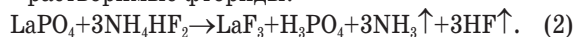
Рис. 10. Дифрактограмма продукта взаимодействия МК и БФА: 1 – монацит, карточка PDF [029–0403]; 2 –  $\text{CeF}_3$  [08–0045]; 3 –  $\text{LaF}_3$  [32–0483]; 4 –  $\text{NdF}_3$  [09–0416]; 5 –  $\text{PrF}_3$  [06–0325]; 6 –  $\text{YF}_3$  [74–0911]; 7 –  $\text{CaF}_2$  [02–1302]; 8 –  $\text{ThP}_2\text{O}_7$  [17–0576]; 9 –  $(\text{NH}_4)_3\text{FeF}_6$  [22–1040]

Fig. 10. X-ray diffraction pattern of the product of interaction between monazite concentrate and ammonium bifluoride: 1 – monazite, PDF Card [029–0403]; 2 –  $\text{CeF}_3$  [08–0045]; 3 –  $\text{LaF}_3$  [32–0483]; 4 –  $\text{NdF}_3$  [09–0416]; 5 –  $\text{PrF}_3$  [06–0325]; 6 –  $\text{YF}_3$  [74–0911]; 7 –  $\text{CaF}_2$  [02–1302]; 8 –  $\text{ThP}_2\text{O}_7$  [17–0576]; 9 –  $(\text{NH}_4)_3\text{FeF}_6$  [22–1040]

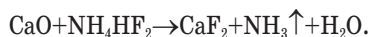
необходимого, после промывки водой. Полученная дифрактограмма представлена на рис. 10.

Из данных, представленных на рис. 10, видно, что при взаимодействии с расплавом БФА:

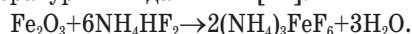
- фосфаты РЗЭ образуют соответствующие мало-растворимые фториды:



- соединения кальция переходят во фторид кальция:



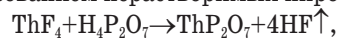
- соединения примесных металлов образуют соответствующие фторметаллаты, что подтверждается присутствием гексафторферрата аммония в продуктах фторирования и согласуется с литературными данными [22]:



Присутствие пирофосфата тория подтверждает сделанные ранее выводы о том, что образующаяся по реакции (2) фосфорная кислота при нагреве в расплаве частично переходит в пирофосфорную:



и затем вступает во взаимодействие с компонентами расплава, в частности с фторидом тория (реакция (1)) с образованием нерастворимых пирофосфатов:



изменение энергии Гиббса данной реакции принимает отрицательные значения при температурах выше 150 °С, а при 230 °С становится равным (–33,4) кДж (рассчитано по данным [3] и базе данных HSC Chemistry 7.1).

Этим также можно объяснить процесс, зафиксированный на термограмме (рис. 5, а) при 272 °С и ранее не объясненный. Возможность образования пирофосфатов кальция при взаимодействии БФА и апатита отмечена в работе [23], но для более высоких температур – при 400 °С.

При анализе продукта до промывки при помощи СЭМ (рис. 11) также обнаружена образованная в процессе гидрофторирования фаза, содержащая железо и фосфор (отмечена стрелками).

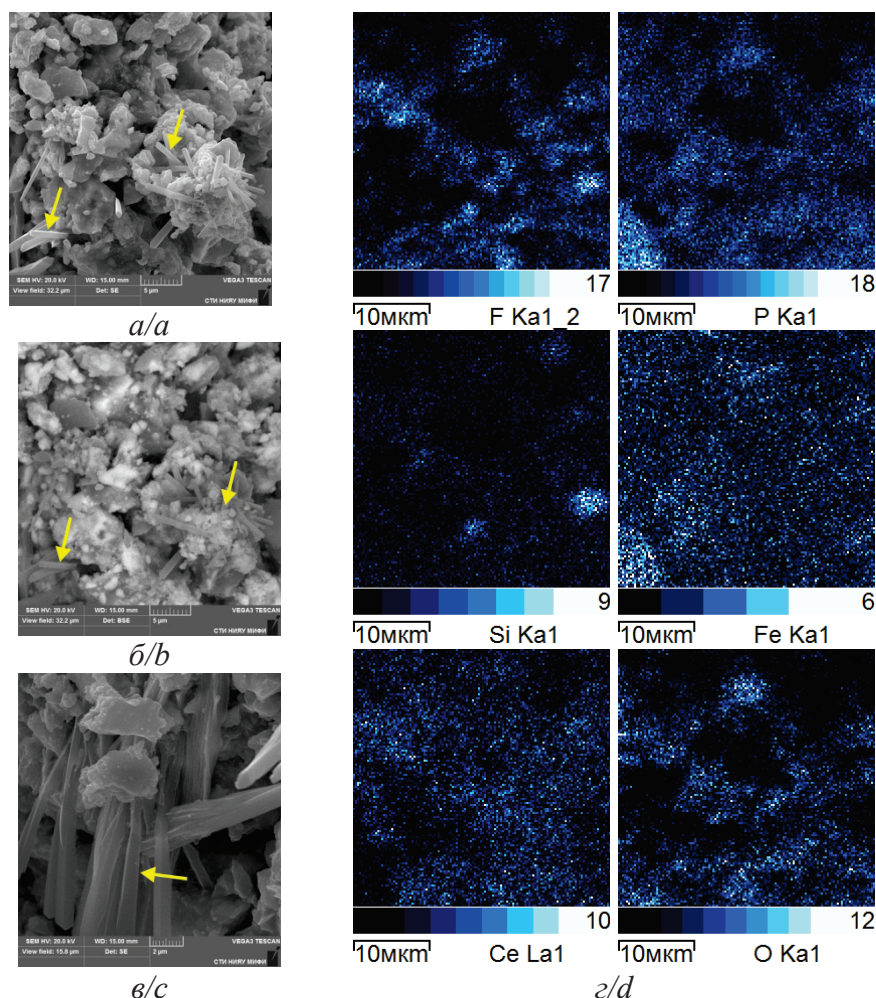


Рис. 11. Изображение агломерата в продуктах фторирования (а) во вторичных и (б) в обратно отраженных электронах; в) увеличенное изображение фазы, содержащей железо и фосфор, во вторичных электронах; г) распределение ряда элементов (указаны под каждой картой) по поверхности, представленной на рис. 11, а, б

Fig. 11. Image of the agglomerate in fluorination products (a) in the secondary and (b) in the backward reflected electrons; c) enlarged image of a phase containing iron and phosphorus in secondary electrons; d) distribution of a number of elements (indicated under each map) along the surface shown in Fig. 11, a, b

Из карт распределения элементов (рис. 11, а) видно, что церий в основном связан с фтором (светлая фаза на рис. 11, б), но также присутствует в областях с повышенным содержанием фосфора, которые, по-видимому, относятся к непрореагировавшему МК. Кремний образует отдельную фазу с фтором, соответствующую, судя по всему, кремнефториду аммония. Железо, фосфор и кислород в некоторых областях встречаются совместно, причем атомарное соотношение фосфора и кислорода приблизительно равно 2,5:9,3, что может соответствовать  $[\text{PO}_4]^{3-}$ . Также в данных областях обнаруживаются примеси алюминия и кальция, содержание фтора варьируется, а содержание азота ниже предела обнаружения. Образование данного соединения объясняет характер зависимостей степеней выщелачивания железа и фосфора от температуры процесса (рис. 7).

По результатам исследования по гидрофторированию МК можно констатировать, что продукты фторирования в основном состоят из фторидов РЗЭ, фторидов или фторааммонийных соединений металлов и относительно небольшого количества непрореагировавшего МК. Железо представлено фазами гексафторферрата аммония и фосфата железа. Фосфор образует растворимые гидрофторфосфаты аммония, малорастворимые фосфат железа и пирофосфат тория, и в небольшом количестве переходит в газообразную фазу, вероятно, в виде  $\text{POF}_3$ .

#### Заключение

1. Определены основные физико-химические свойства монацитового концентрата. Содержание оксидов РЗЭ варьируется от 41,00 до 43,89 мас. %,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 19,92–20,67 мас. %,  $\text{SiO}_2$  – 3,14–3,36 мас. %,  $\text{ThO}_2$  – 5,88–6,11 мас. %,  $\text{U}_3\text{O}_8$  0,16–0,28 мас. %.
2. При изучении пространственного распределения элементов методом СЭМ неоднородность в распределении кальция, тория и кремния по шлифу зерна МК позволила предположить наличие в монаците вростков хаттонита и чералита. Присутствие хаттонита было также подтверждено методом рентгенофазового анализа, кроме того, обнаружена фаза  $\text{Nd}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Modified acidic leaching for selective separation of thorium, phosphate and rare earth concentrates from Egyptian crude monazite / E.H. Borai, M.A. El-Ghany, I.M. Ahmed, M.M. Hamed et al. // International Journal of Mineral Processing. – 2016. – V. 149. – P. 34–41. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.02.003
2. Sadri F., Rashchi F., Amini A. Hydrometallurgical digestion and leaching of Iranian monazite concentrate containing rare earth elements Th, Ce, La and Nd // International Journal of Mineral Processing. – 2017. – V. 159. – P. 7–15. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.12.003
3. Demol J., Ho E., Senanayake G. Sulfuric acid baking and leaching of rare earth elements, thorium and phosphate from a monazite concentrate: Effect of bake temperature from 200 to 800 °C // Hydrometallurgy. – 2018. – V. 179. – P. 253–267. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.06.002
4. Borai E.H., El Afifi E.M., El-Din A.S. Selective elimination of natural radionuclides during the processing of high grade monazite concentrates by caustic conversion method // Korean Journal of Chemical Engineering. – 2017. – V. 34. – № 4. – P. 1091–1099. DOI: 10.1007/s11814-016-0350-9
5. Alkali pug bake process for the decomposition of monazite concentrates / L. Berry, J. Galvin, V. Agarwal, M.S. Safarzadeh // Minerals Engineering. – 2017. – V. 109. – P. 32–41. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.02.007
6. Brisson V.L., Zhuang W.Q., Alvarez-Cohen L. Bioleaching of rare earth elements from monazite sand // Biotechnology and bioengineering. – 2016. – V. 113. – № 2. – P. 339–348. DOI: 10.1002/bit.25823
3. Для эффективного удаления кремния с целью увеличения выхода РЗЭ во фториды, а также разложения трудновскрываваемой кристаллической решетки самого монацита были проведены исследования по фторированию МК. В качестве реагента был выбран БФА как более безопасный с экологической точки зрения по сравнению с  $\text{HF}$  и  $\text{F}_2$ , а также благодаря возможности его регенерации с возвратом в процесс.
4. На основании термогравиметрического анализа показано, что при взаимодействии МК с БФА в первую очередь в реакцию вступают примеси, и лишь потом компоненты монацита. Образующаяся при этом фосфорная кислота взаимодействует с БФА с образованием гидродифторфосфата аммония, который затем разрушается до гидромонофторфосфата аммония с выделением, по-видимому,  $\text{POF}_3$ . Это предположение подтверждено дальнейшими исследованиями: основная часть фосфора при фторировании остается в твердой фазе (49,2–83,3 %), в жидкую переходит 12,0–32,8 %, в газообразную – 11,2–28,1 %. По результатам анализа продукта фторирования методами рентгенофазового анализа и СЭМ показано присутствие в твердой фазе пирофосфата тория и фосфата железа. Образование данных соединений позволяет предположить возможность их отделения от РЗЭ на стадии выщелачивания при дальнейшей кислотной переработке продуктов фторирования.
5. Экспериментально показано, что содержания в продуктах фторирования после выщелачивания водой кремния значительно снижается (до 0,17–0,51 мас. %) по сравнению с его содержанием в исходном концентрате. По составленному материальному балансу 10,4–38,4 % кремния от его содержания в исходном концентрате переходит в газовую фазу в виде  $\text{SiF}_4$ , 55,3–75,9 % – в раствор выщелачивания в виде растворимого  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ .
6. На основании полученных результатов выбраны оптимальные условия для проведения процесса гидрофторирования МК БФА: температура 210 °C; содержание БФА 80 % от стехиометрии; продолжительность процесса 1,5 часа.



7. Selective extraction of rare earth elements from complex monazite ores / L.A.V. Teixeira, R.G. Silva, D. Majuste, V. Ciminelli // Extraction 2018. Proc. of the First Global Conference on Extractive Metallurgy. – Canada: Springer, Cham, 2018. – P. 2381–2390. DOI: 10.1007/978-3-319-95022-8\_200
8. Технологические аспекты переработки редкометаллических руд Чукотского месторождения / В.И. Кузьмин, Г.Л. Пашков, В.Н. Кузьмина, С.Н. Калякин // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – Т. 18. – № 3. – С. 331–338.
9. The study of rare earth production based on processing of phosphorus-containing concentrates / A.S. Bujnovskij, V.I. Sachkov, P.B. Molokov, A.V. Anufrieva // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 683. – P. 209–213. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.683.395
10. Выделение редкоземельных элементов, урана и тория из монацитового концентрата методом сверхкритической флюидной экстракции / М.Д. Самсонов, Т.И. Трофимов, Ю.М. Куляко, С.Е. Винокуров и др. // Радиохимия. – 2015. – Т. 57. – № 4. – С. 291–294.
11. Решина С.А., Попова В.И., Баженова Л.Ф. Минералогия монацитовых концентратов ОГУ «Уралмонацит» // Уральский минералогический сборник. – 2008. – № 15. – С. 17–26.
12. Решина С.А. Распределение редкоземельных элементов в кристаллах монацита из концентратов ОГУ «Уралмонацит» // Уральский минералогический сборник. – 2009. – № 16. – С. 100–112.
13. Geochemistry of Monazite within Carbonatite Related REE Deposits / W. Chen, H. Honghui, T. Bai, S. Jiang, W. Chen et al. // Resources. – 2017. – V. 6. – № 4. – P. 51–65. DOI: 10.3390/resources6040051
14. Decomposition of diverse solid inorganic matrices with molten ammonium bifluoride salt for constituent elemental analysis / M.J. O'Hara, C.M. Kellogg, C.M. Parker, S.S. Morrison et al. // Chemical Geology. – 2017. – V. 466. – P. 341–351. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2017.06.023.
15. Influence of  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  activation on leaching of low-grade complex copper ore in  $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$  solution / J. Han, W. Liu, K. Xue, W. Qin et al. // Separation and Purification Technology. – 2017. – V. 181. – P. 29–36. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.03.012
16. Ищенко А.А. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа. – М.: ИЦ «Академия», 2010. – Т. 2. – 416 с.
17. Способ переработки монацитового концентрата: пат. Российская Федерация № 2549412 МПК C01F 17/00; заявл. 14.10.2013; опуб. 27.04.2015, Бюл. № 12. – 7 с.
18. Исследование вскрытия монацита смесью серной кислоты и гидрофторида аммония / Д.В. Акимов, А.Н. Дьяченко, Н.Б. Егоров, А.Д. Киселёв, К.В. Обмуч // Фторидные технологии в атомной промышленности. Громовские Чтения. – Томск: ТПУ, 2014. – С. 41–42.
19. Influence of adding ammonium bifluoride when leaching monazite using sulphuric acid / N. Egorov, N. Dyachenko, D. Akimov et al. // Procedia Chemistry. – 2014. – V. 10. – P. 168–172. DOI: 10.1016/j.proche.2014.10.029
20. Лапташ Н.М., Кайдалова Т.А. Твердофазное взаимодействие фторапатита с гидрофторидом аммония // Журнал неорганической химии. – 1996. – Т. 41. – № 4. – С. 557–559.
21. Крайденко Р.И. Фтороаммонийное разделение многокомпонентных силикатных систем на индивидуальные оксиды: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 2008. – 21 с.
22. Раков Э.Г., Мельниченко Е.И. Свойства и реакции фторидов аммония // Успехи химии. – 1984. – Т. LIII. – № 9. – С. 1463–1492.
23. Горбенко О.М., Эпов Д.Г., Полищук С.А. Исследование взаимодействия гидрофторида аммония с пирротинитом и фторапатитом // Тезисы докладов IX Всесоюзного симпозиума по химии неорганических фторидов. – Череповец, 1990. – С. 110.

Поступила 14.11.2018 г.

#### Информация об авторах

**Муслимова А.В.**, старший преподаватель кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Буйновский А.С.**, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Молоков П.Б.**, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Софронов В.Л.**, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

UDC 546:650.161.185

## INTERACTION OF MONAZITE AND AMMONIUM BIFLUORIDE

**Alexandra V. Muslimova<sup>1</sup>**,  
klameri7@gmail.com

**Alexander S. Buinovskiy<sup>1</sup>**,  
ASBujnovskij@mephi.ru

**Petr B. Molokov<sup>1</sup>**,  
PBMolokov@mephi.ru

**Vladimir L. Sofronov<sup>1</sup>**,  
VLSofronov@mephi.ru

<sup>1</sup> Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
65, Kommunisticheskoy avenue, Seversk, 636036, Russia.

Up-to-date technologies providing scientific and technological progress are based on the unique properties of rare-earth metals and their compounds. In recent years, the attempts have been made to revive rare-earth metals production in Russia, mainly using the sources from which rare-earth elements can be extracted simultaneously (apatites, phosphorites and products of their processing). Another source of rare-earth elements, which is a ready concentrate, is monazite concentrate stored in the warehouse of the state government institution of the Sverdlovsk region «UralMonatsit» in Krasnoufimsk. The known industrial technologies of its processing (alkaline and sulfuric acid) have a number of drawbacks, in particular, the incompleteness of rare-earth elements extraction and the complexity of separating thorium from rare-earth elements. Therefore, there is the relevance of the work on improving the processing technologies of monazite raw materials with extraction of rare-earth elements concentrate and its refinement from impurities, including purification from thorium. To decompose the difficult-to-open crystalline lattice of monazite effectively, its fluorination with ammonium hydrofluoride as a relatively environmentally friendly and regenerable reagent is proposed.

**The main aim** of the research is to study the process and determine the features of interaction of monazite concentrate with ammonium bifluoride to produce a product suitable for further sulfuric acid processing.

**The object** of the research is a sample of monazite concentrate in the storage of the SGI SR UralMonatsit.

**Research methods.** Atomic emission spectroscopy with inductively coupled plasma, X-ray fluorescence analysis, neutron activation analysis, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy with microanalysis, method of combined thermogravimetric/differential-thermogravimetric/differential scanning calorimetric analysis.

**Results.** The paper considers the first stage of the proposed fluorammonium-sulfuric acid processing of monazite concentrates, i.e. the hydrofluorination stage. In the interaction of monazite concentrate with ammonium bifluoride, the impurities contained in the concentrate are the first to enter into a reaction with the formation of fluorides and fluorammonium compounds; after that the rare-earth metals phosphates enter into reaction. The resulting phosphoric acid reacts with ammonium bifluoride to form ammonium hydrophosphates and a slight phosphorus emission into the gaseous phase. This is confirmed by the results of studies carried out in the temperature range of 170–250 °C: 49,2–83,3 % of phosphorus remains in the solid phase during fluorination, 12,0–32,8 % of phosphorus changes into the liquid phase, 11,2–28,1 % of phosphorus changes into gaseous phase. With a further increase in temperature up to 500 °C, there are no signs of reaction proceeding on the obtained TGA and DSC curves. This allows us to say that complete distillation of phosphorus from the fluorination products in the studied temperature range is impossible. According to the material balance, 10,4–38,4 % of silicon from its content in the initial concentrate transforms into the gas phase in the form of SiF<sub>4</sub>, 55,3–75,9 % – into the leaching solution in the form of soluble (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, which can be decomposed to gaseous SiF<sub>4</sub> with further acid processing. On the basis of the results obtained, optimal conditions for fluorination of the monazite concentrate with ammonium hydrofluoride are chosen: temperature is 210 °C; ammonium bifluoride content is 80 % of stoichiometry; the duration of the process is 1,5 hours.

#### Key words:

Monazite, monazite concentrate, ammonium hydrogen difluoride, ammonium bifluoride, rare-earth elements, thorium, silicon, phosphorus.

#### REFERENCES

1. Borai E.H., El-Ghany M.A., Ahmed I.M., Hamed M.M. Modified acidic leaching for selective separation of thorium, phosphate and rare earth concentrates from Egyptian crude monazite. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, vol. 149, pp. 34–41. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.02.003
2. Sadri F., Rashchi F., Amini A. Hydrometallurgical digestion and leaching of Iranian monazite concentrate containing rare earth elements Th, Ce, La and Nd. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, vol. 159, pp. 7–15. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.12.003
3. Demol J., Ho E., Senanayake G. Sulfuric acid baking and leaching of rare earth elements, thorium and phosphate from a monazite concentrate: Effect of bake temperature from 200 to 800 °C. *Hydrometallurgy*, 2018, vol. 179, pp. 253–267. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.06.002
4. Borai E.H., El Afifi E.M., El-Din A.S. Selective elimination of natural radionuclides during the processing of high grade monazite concentrates by caustic conversion method. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2017, vol. 34, no. 4, pp. 1091–1099. DOI: 10.1007/s11814-016-0350-9
5. Berry L., Galvin J., Agarwal V., Safarzadeh M.S. Alkali pug bake process for the decomposition of monazite concentrates. *Minerals Engineering*, 2017, vol. 109, pp. 32–41. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.02.007
6. Brisson V.L., Zhuang W.Q., Alvarez-Cohen L. Bioleaching of rare earth elements from monazite sand. *Biotechnology and bioengineering*

- neering, 2016, vol. 113, no. 2, pp. 339–348. DOI: 10.1002/bit.25823
7. Teixeira L.A.V., Silva R.G., Majuste D., Ciminelli V. Selective extraction of rare earth elements from complex monazite ores. *Extraction 2018. Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy*. Canada, Springer, Cham, pp. 2381–2390. DOI: 10.1007/978-3-319-95022-8\_200
  8. Kuzmin V.I., Pashkov G.L., Kuzmina V.N., Kalyakin S.N. Technological features of the rare-metal ores from the Chuktukon deposit. *Chemistry for Sustainable Development*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 331–338. In Rus.
  9. Bujnovskij A.S., Sachkov V.I., Molokov P.B., Anufrieva A.V. The study of rare earth production based on processing of phosphorus-containing concentrates. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 683, pp. 209–213. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.683.395
  10. Samsonov M.D., Trofimov T.I., Kulyako Y.M., Vinokurov S.E. Recovery of rare earth elements, uranium, and thorium from monazite concentrate by supercritical fluid extraction. *Radiochemistry*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 291–294. In Rus.
  11. Repina S.A., Popova V.I., Bazhenova L.F. Mineralogy of the monazite concentrations from «UralMonazite». *Ural Mineralogy Collected Papers*, 2008, no. 15, pp. 17–26. In Rus.
  12. Repina S.A. Distribution of REE in monazite crystals from concentrations of «UralMonazite». *Ural Mineralogy Collected Papers*, 2009, no. 16, pp. 100–112. In Rus.
  13. Chen W., Honghui H., Bai T., Jiang, S. Chen W. Geochemistry of Monazite within Carbonatite Related REE Deposits. *Resources*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 51–65. DOI: 10.3390/resources6040051
  14. O'Hara M.J., Kellogg C.M., Parker C.M., Morrison S.S. Decomposition of diverse solid inorganic matrices with molten ammonium bifluoride salt for constituent elemental analysis. *Chemical Geology*, 2017, vol. 466, pp. 341–351. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2017.06.023
  15. Han J., Liu W., Xue K., Qin W. Influence of  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  activation on leaching of low-grade complex copper ore in  $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$  solution. *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 181, pp. 29–36. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.03.012
  16. Ishenko A.A. *Analiticheskaya khimiya i fiziko-khimicheskie metody analiza* [Analytical chemistry and physical and chemical laboratory test]. Moscow, Academiya Publ., 2010. Vol. 2, 416 p.
  17. Akimov D.V., Diachenko A.N., Egorov N.B., Kiselev A.D., Larin V.K. *Sposob pererabotki monatsitovogo kontsentrata* [Method of processing monazite concentrate]. Patent RF, no. 2549412, 2015.
  18. Akimov D.V., Diyachenko A.N., Egorov N.B., Kiselev A.D., Obmuch K.V. Issledovanie vskrytiya monatsita smesyu sernoy kisloty i gidrodiflorida ammoniya [Investigation of dissection of monazite with a mixture of sulfuric acid and ammonium hydrofluoride]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ftoridnye tekhnologii v atomnoy promyshlennosti* [Fluoride technologies in the nuclear industry. Proc. of the All-Russia research to practice conference]. Tomsk, TPU Publ., 2014. pp. 41–42.
  19. Egorov N., Dyachenko N., Akimov D. Influence of adding ammonium bifluoride when leaching monazite using sulphur acid. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 168–172. DOI: 10.1016/j.proche.2014.10.029
  20. Laptash N.M., Kaidalova T.A. Solid-Phase Interaction of Fluorapatite with Ammonium Hydrogen Difluoride. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1996, vol. 41, no. 4, pp. 557–559. In Rus.
  21. Kraydenko R.I. *Ftoroammoniyne razdelenie mnogokomponentnykh silikatnykh sistem na individualnye oksidy*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Separation of multicomponent silicate systems into individual oxides by fluorammonium method. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2008. 21 p.
  22. Rakov E.G., Melnichenko E.I. The Properties and Reactions of Ammonium Fluorides. *Russian Chemical Reviews*, 1984, vol. 53, no. 9. pp. 1463–1492. In Rus.
  23. Gorbenko O.M., Epov D.G., Polishchuk S.A. Issledovanie vzaimodeystviya gidroftorida ammoniya s pirrotinom i ftorapatitom [Study of interaction of ammonium hydrofluoride with pyrrhotine and fluorapatite]. *Materialy IX vsesoyuznogo simpoziuma po khimii neorganicheskikh ftoridov* [Proc. of the IX All-Soviet Union Symposium on the inorganic fluoride chemistry]. Cherepovets, MHTI im. Mendeleeva Publ., 1990. pp. 110.

Received: 14 November 2018.

#### Information about the authors

**Alexandra V. Muslimova**, senior lecturer, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Alexander S. Buinovskiy**, Dr. Sc., professor, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Petr B. Molokov**, Cand. Sc., associate professor, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Vladimir L. Sofronov**, Dr. Sc., professor, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

УДК 66.096.5: 62-971.2; 66.094.3.097

## СОВМЕСТНОЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЕ СЖИГАНИЕ САЖИ И ВОДОРОДА В КИПАЩЕМ СЛОЕ

Языков Николай Алексеевич<sup>1</sup>,  
yazykov@catalysis.ru

Симонов Александр Дмитриевич<sup>1</sup>,  
simonov@catalysis.ru

<sup>1</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск пр. Академика Лаврентьева, 5.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью обезвреживания выбросов сажи и водорода из печей нанесения углеродных покрытий на сорбенты, которые в основном сжигаются в факельном режиме. Это приводит к образованию термических оксидов азота и не обеспечивает полного сгорания сажи.

**Цель:** определение оптимальных условий проведения процесса совместного сжигания продуктов пиролиза бутадиена в кипящем слое катализатора глубокого окисления на реальных выбросах смеси сажи и водорода из печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты.

**Объекты:** реальные выбросы смеси сажи и водорода из печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты.

**Методы:** хроматографический анализ отходящих газов из реактора с кипящим слое катализатора при сжигании смеси сажи и водорода, фотоколориметрический анализ газов на содержание оксидов азота с использованием реактива Грисса–Илосвая, весовой метод определения выбросов сажи. Удельную поверхность сажи определяли на основе данных изотермы низкотемпературной адсорбции азота.

**Результаты.** Определены оптимальные условия проведения процесса совместного сжигания продуктов пиролиза бутадиена в кипящем слое катализатора глубокого окисления на реальных выбросах смеси сажи и водорода из печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты. Показано, что при совместном каталитическом сжигании сажи и водорода в кипящем слое промышленного катализатора ИК-12-70 происходит практически полное окисление водорода при температуре на уровне 550 °С, а степень выгорания углерода в виде сажи достигает значения не ниже 99,9 %. Выбросы вредных веществ незначительны: NO<sub>x</sub> – не более 4,5 мг/м<sup>3</sup>, СО – не более 0,037 об. %.

### Ключевые слова:

Кипящий слой, катализатор, водород, сажа, углерод, совместное сжигание, углеродминеральный сорбент.

### Введение

Сжигание твердых топлив, таких как уголь, может быть осуществлено в факельном режиме сжигания в печах при температурах до 1200 °С, при этом топливо подается в пылевидном состоянии [1, 2]. Для повышения эффективности сжигания используют механическую активацию твердого топлива [3]. Использование печей с кипящим слоем инертного материала, которые позволяют сжигать частицы угля с более крупным гранулометрическим составом, позволяет снизить температуру сжигания твердых топлив до 850–900 °С [4–6]. Основными недостатками этих методов сжигания являются большие габариты аппаратов, высокие температуры отходящих газов, механическая и химическая неполнота сжигания топлив, высокое содержание вредных веществ в отходящих газах.

В Институте катализа СО РАН разработан альтернативный способ сжигания твердых, жидких и газообразных топлив в кипящем слое катализатора [7]. Данный метод позволяет сжигать топливо при температурах ниже 800 °С. Это дает возможность значительно уменьшить выброс токсичных веществ, снизить металлоемкость аппарата и понизить температуру отходящих газов. Такой способ позволяет сжигать эффективно различные топлива [8–11]. Присутствие пористого катализатора обеспечивает высокие скорости химических ре-

акций, протекающих в аппарате [7, 12]. В связи с этим представляет интерес использование этого способа для сжигания газопылевых выбросов.

Такие газопылевые выбросы образуются при получении углеродминеральных сорбентов. Углеродминеральные сорбенты представляют собой неорганическую пористую матрицу, на которую нанесен углерод. Получить такие сорбенты можно при пиролизе твердых продуктов, содержащих органическую часть или путем нанесения углерода на неорганический пористый носитель. В частности, углеродминеральные сорбенты, которые нашли применение в промышленности, получают из рисовой шелухи, содержащей до 13–29 % SiO<sub>2</sub> [13]. При проведении окислительного пиролиза рисовой шелухи, в процессе которого происходит формирование углеродного покрытия на пористой матрице SiO<sub>2</sub> и окисление летучих веществ в кипящем слое катализатора полного окисления, образуется углеродминеральный сорбент с площадью удельной поверхности 232 м<sup>2</sup>/г в одну стадию [13]. Для получения сорбентов из рисовой шелухи с более высокой площадью удельной поверхности используют активацию с применением, например, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> [14, 15]. В случае обработки рисовой шелухи K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> при 900 °С возможно получение сорбентов с площадью удельной поверхности 794–1329 м<sup>2</sup>/г [14]. При использовании уже карбонизированного продукта при 800 °С получа-



ют углеродминеральные сорбенты с площадью удельной поверхности более  $2000 \text{ м}^2/\text{г}$ . Углеродминеральные сорбенты с такой высокой площадью удельной поверхности могут быть использованы в промышленности не только для очистки газов и жидкостей, но и как сырье для получения суперконденсаторов [16].

В медицине используют углеродминеральные сорбенты на основе пористых синтетических неорганических носителей [17–19]. Наиболее широкое применение нашел углеродминеральный сорбент СУМС-1 на основе пористого оксида алюминия с площадью удельной поверхности на уровне  $200 \text{ м}^2/\text{г}$ , который используется как энтеросорбент и как дополнительный компонент в комплексной терапии различных соматических и хирургических заболеваний [17]. При получении таких сорбентов при разложении, например, бутадиена в печах нанесения углеродных покрытий на сорбенты при температуре  $700\text{--}900^\circ\text{C}$  образующийся углерод наносится на развитую поверхность минерального сорбента не полностью и на выходе из печи образуется смесь сажи и водорода. Такие выбросы часто сжигаются в факельном режиме при высоких температурах с образованием вредных веществ в отходящих газах, при этом наблюдается механическая и химическая неполнота сжигания сажи.

Целью данной работы было определение оптимальных условий совместного сжигания продуктов пиролиза бутадиена в кипящем слое катализатора глубокого окисления на реальных выбросах смеси сажи и водорода из печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты.

#### Экспериментальная часть

Исследование процесса сжигания смеси водорода и сажи, образующихся при разложении бутадиена в печи нанесения углеродных покрытий, в присутствии катализатора проводили на установке с использованием реактора с кипящим слоем. Принципиальная схема установки показана на рисунке. В работе использовали катализатор ИК-12-70 (ТУ 6-09-32-36-82.  $13,2\% \text{ Cr}_2\text{O}_3$ ,  $6,8\% \text{ CuO}$ , остальное  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) производства ОАО «СКТБ Катализатор» с диаметром частиц  $2 \text{ мм}$ . В качестве сорбента использовали алюминия оксид сферический (ТУ 6-68-139-93) производства ОАО «СКТБ Катализатор» с диаметром частиц  $0,4\text{--}0,8 \text{ мм}$ .

Реактор кипящего слоя для дожигания выбросов водорода и сажи представляет собой цилиндр с внутренним диаметром  $120 \text{ мм}$ , снабженный неизолированной насадкой для создания градиента температур между зонами сжигания (нижняя часть реактора) и теплоотвода (верхняя часть реактора), где установлен теплообменник. Материал реактора – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. При подаче топлива в виде смеси сажи и водорода, образующихся в печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты, в кипящий слой катализатора

полного окисления при  $440\text{--}730^\circ\text{C}$  происходит его сгорание до неизолированной решетки в нижней части реактора. Одновременно в верхней части реактора происходит отвод теплоты теплообменником, погруженным в кипящий слой катализатора, что позволяет сжигать горючие продукты при соотношениях с воздухом, близких к стехиометрическим. Смесь сажи и водорода из печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты в реактор с кипящим слоем катализатора подавали через трубку с затвором, чтобы частицы катализатора не попадали в печь нанесения углеродных покрытий.

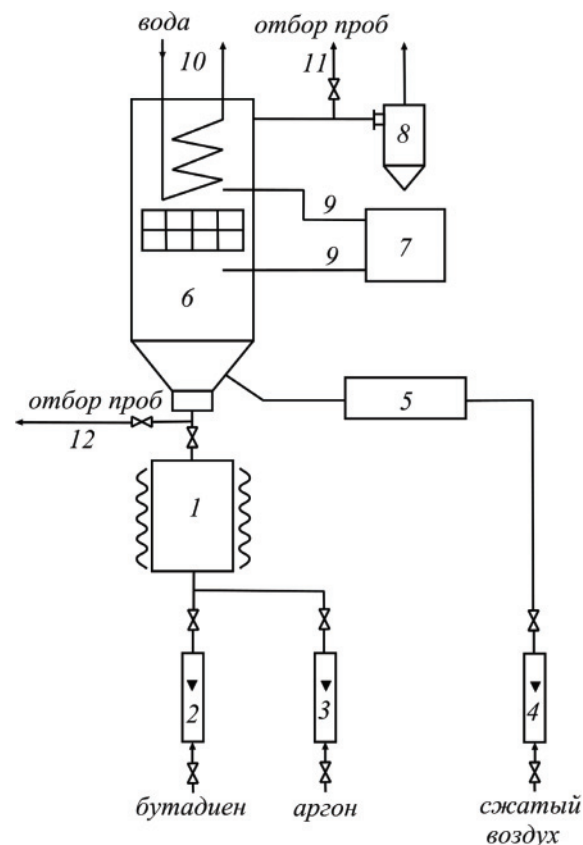


Рисунок. Принципиальная схема установки дожигания выбросов печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты: 1 – печь нанесения углеродных покрытий на сорбенты; 2 – ротаметр на линии подачи бутадиена; 3 – ротаметр на линии подачи аргона; 4 – ротаметр на линии подачи сжатого воздуха; 5 – электрический воздушонагреватель; 6 – реактор с кипящим слоем катализатора; 7 – прибор контроля температуры; 8 – циклон; 9 – термопары; 10 – теплообменник; 11 – штуцер для отбора проб на выходе из реактора; 12 – штуцер для отбора проб на выходе из печи

Figure. Principle scheme of post-combustion of emissions from furnace for sorbents carbon coating: 1 is the furnace for sorbents carbon coating; 2 is the rotameter on the butadiene feed line; 3 is the rotameter on the argon feed line; 4 is the rotameter on the line supplying compressed air; 5 is the electric heater; 6 is the reactor with a fluidized bed of catalyst; 7 is the temperature control device; 8 is the cyclone; 9 are the thermocouples; 10 is the heat exchanger; 11 is the pipe for sampling at the exit of the reactor; 12 is the pipe for sampling at the exit of the furnace

Для исключения попадания кислорода в печь – 1 для нанесения углеродных покрытий через ротаметр – 3 подавали аргон, после чего через ротаметры – 4 в реактор подавали воздух, который подогревали в электронагревателе – 5 до температуры 700–750 °С. После 1 часа разогрева температура кипящего слоя катализатора достигала 350–450 °С. Одновременно температуру в печи с помощью электрического подогревателя поднимали до 700–900 °С. При достижении указанной температуры в печи через ротаметр – 2 подавали бутadiен, который разлагался в печи на водород и сажу ( $S_{уд}=150 \text{ м}^2/\text{г}$ ,  $\rho_{нас}=0,05 \text{ г/см}^3$ ). Смесь сажи и водорода в токе аргона поступала в реактор, где происходило сгорание сажи и водорода в кипящем слое катализатора. При этом наблюдали повышение температуры в слое катализатора. Газовая смесь поступала на циклон для отделения пыли и затем сбрасывалась в вытяжную систему.

Отбор проб на содержание сажи в газовой смеси после реактора с кипящим слоем осуществляли через штуцер – 11, после печи нанесения углеродных покрытий через штуцер – 12. Для определения содержания сажи газовую смесь откачивали насосом со скоростью 20 л/мин в течение 10 мин через холодильник и фильтр. После отбора пробы фильтр высушивали при комнатной температуре в эксикаторе с силикагелем марки МСМК в течении 24 часов. Количество уловленной сажи определяли по разнице в весе фильтра с сажей и исходным фильтром после сушки в эксикаторе.

Степень выгорания углерода в виде сажи  $\beta$  определяли по формуле:

$$\beta=100(G_C^{нп}-G_C^p)/G_C^{нп},$$

где  $G_C^{нп}$  – количество углерода в единицу времени на выходе из печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты, г/ч;  $G_C^p$  – количество углерода в единицу времени на выходе из реактора с кипящим слоем катализатора, г/ч.

Отбор проб газа для анализа осуществляли с использованием проточных емкостей (3 шт) объемом 1 л с двумя вентилями. Содержание в отходящих газах  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  определяли на хроматографах ЛХМ-80 (Россия) с использованием детекторов по теплопроводности, колонки с NaX (для определения концентрации  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ) и паропаком Q (для определения концентрации  $CO_2$ ). Внутренний диаметр колонок 3 мм, длина колонок 2 м. Режим работы хроматографов: ток детектора по теплопроводности 110 мА, температура детектора по теплопроводности 70 °С, температура термостата 20 °С, газ-носитель – гелий, расход гелия 30  $\text{см}^3/\text{мин}$ .

Определение  $NO_x$  в отходящих газах из реактора проводили по методу определения концентраций оксидов азота, приведенного в работе [20], с использованием реактива Грисса-Илосвая. Метод основан на взаимодействии нитрит иона и  $\alpha$ -аминобензолсульфокислоты (сульфаниловой кислоты) с образованием диазосоединения, которое, реагируя с 1-нафтиламином, дает азокраситель, окра-

шивающий раствор от бледно-розового до красно-фиолетового цвета. Интенсивность окраски пропорциональна концентрации нитратов. Для измерений оптической плотности растворов после поглощения оксидов азота использовали фотоколориметр КФК-2 (Россия).

Удельную поверхность сажи определяли на основе данных изотермы низкотемпературной адсорбции азота, полученной на автоматизированной волюметрической установке ASAP-2400 фирмы Micromeritics, США.

### Результаты и их обсуждение

Первоначально процесс каталитического сжигания смеси сажи и водорода проводили при загрузке катализатора ИК-12-70 до 7 л, при этом температура в реакторе не превышала 400–450 °С в результате сильного взаимодействия с теплообменником в верхней части реактора, что приводило к значительному недожогу сажи при подаче смеси углерода с водородом в реактор. Для увеличения температуры слоя катализатора при дожигании выбросов засыпку катализатора уменьшили до 5,0–5,5 л, что обеспечило температуру в слое катализатора 550–730 °С при выходе на рабочий режим.

**Таблица.** Результаты испытаний реактора с кипящим слоем катализатора ИК-12-70 при сжигании выбросов водорода и сажи из печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты

**Table.** Test results of the reactor with a fluidized bed of the catalyst IK-12-70 at combustion of soot and hydrogen emissions from the furnace for sorbents carbon coating

$V_6$	$G_C^n$	$G_C^{нп}$	$G_{H_2}^{нп}$	$T_p, ^\circ\text{C}$	$V_a$	$G_C^p$	$\beta$	Примечание Note
280,0	599,8	134,8	75,0	480–500	7,2	0,38	99,72	Нанесение С на сорбент C coating of sorbent
280,0	599,8	134,8	75,0	510–530	7,2	0,25	99,81	
280,0	599,8	134,8	75,0	530–550	7,2	0,22	99,84	
121,4	260,0	60,0	32,5	440–480	7,2	0,38	99,37	
121,4	260,0	60,0	32,5	500–530	7,2	0,04	99,93	
121,4	260,0	60,0	32,5	540–555	7,2	0,01	99,98	Без сорбента Without sorbent
210,0	449,9	449,9	56,2	550–560	7,2	0,35	99,92	
240,0	514,1	514,1	64,3	540–570	7,2	0,72	99,86	
240,0	514,1	514,1	64,3	600	7,2	0,72	99,86	
60,0	128,5	128,5	16,1	400–490	6,0	1,28	99,0	
60,0	128,5	128,5	16,1	590–640	6,0	1,00	99,22	
60,0	128,5	128,5	16,1	650–730	6,0	0,92	99,28	
100,0	214,2	214,2	26,8	560–570	6,3	0,24	99,87	
100,0	214,2	214,2	26,8	580–590	6,3	0,17	99,92	

Обозначения:  $V_6$  – расход бутadiена, л/ч;  $G_C^n$  – количество углерода, образующегося в единицу времени в печи нанесения углеродных покрытий, г/ч;  $G_{H_2}^{нп}$  – количество водорода на выходе из печи нанесения углеродных покрытий, г/ч;  $T_p, ^\circ\text{C}$  – температура в кипящем слое катализатора;  $V_a$  – расход воздуха на сжигание смеси сажи и водорода,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\beta$  – степень выгорания углерода, %.

Description:  $V_6$  is the consumption of butadiene, g/h;  $G_C^n$  is the amount of carbon produced per unit of time in the furnace for sorbents carbon coating, g/h;  $G_{H_2}^{нп}$  is the amount of hydrogen at the outlet of the furnace for sorbents carbon coating, g/h;  $T_p, ^\circ\text{C}$  is the temperature in the fluidized bed of the catalyst;  $V_a$  is the air volume for combustion of a mixture of soot and hydrogen,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\beta$  is the burn-off degree of soot, %.

Дальнейшее испытание установки проводили при загрузке катализатора ИК-12-70 5,0–5,5 л. Разложение проводили в печи как при нанесении углеродных покрытий на сорбент, так и в отсутствии сорбента.

Сжигание выбросов печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты при температурах кипящего слоя катализатора ИК-12-70 550–600 °С позволяет достигнуть степени выгорания сажи 99,64–99,98 %. Следует отметить, что количество водорода в выбросах не оказывает существенного влияния на процесс сгорания частиц сажи. Например, при весовом соотношении углерода и водорода в выбросах 1,80–1,85, когда за счет нанесения углерода на сорбенты содержание углерода в выбросах снижается, степень выгорания сажи при температуре 550 °С составило 99,94–99,98 %. При весовом соотношении углерода и водорода, равном 8,0, когда разложение бутана происходит без сорбентов в печи, при той же температуре в реакторе с кипящим слоем катализатора степень выгорания сажи составила 99,92–99,86 %, при этом содержание вредных веществ во всех случаях незначительно:  $\text{NO}_x$  – не более 4,5 мг/м<sup>3</sup>,  $\text{CO}$  – не более 0,037 об. %. Метана и водорода на выходе из реактора с кипящим слоем катализатора не обнаружено.

Таким образом, не зависимо от концентрации водорода на выходе из печи нанесения углеродных покрытий на сорбенты, при температуре проведения процесса каталитического сжигания в кипящем слое на уровне 550 °С достигается степень выгорания сажи не ниже 99,9 %.

#### Заключение

Проведено исследование процесса совместного сжигания сажи и водорода, образующихся из бутана в печи нанесения углеродных покрытий на сорбент, в кипящем слое катализатора глубокого окисления на реальных выбросах смеси, определены оптимальные условия проведения процесса. Показано, что при температуре процесса на уровне 550 °С происходит практически полное окисление водорода, при этом достигается степень выгорания частиц сажи не ниже 99,9 %, а выбросы вредных веществ незначительны:  $\text{NO}_x$  – не более 4,5 мг/м<sup>3</sup>,  $\text{CO}$  – не более 0,037 об. %.

Каталитический способ сжигания в кипящем слое может быть использован для эффективного сжигания выбросов печей нанесения углеродных покрытий на минеральные сорбенты.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИК СО РАН (проект № 0303-2016-0012).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. – М; Л: Госэнергоиздат, 1951. – 328 с.
2. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. – М: Изд-во АН СССР, 1958. – 601 с.
3. Кузнецов А.В., Бутаков Е.Б. Исследование влияния механической активации на горение угольного топлива // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 37–44
4. Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое. – М: Энергоиздат, 1987. – 112 с.
5. Oka S.N. Fluidized Bed Combustion. – New York, Basel: Marcel Dekker, Inc, 2004. – 590 p
6. Yates J.G. Fundamentals of fluidized bed chemical processes. – London: Butterworths, 1983. – 289 p.
7. Боресков Г.К. Гетерогенный катализ. – М: Наука, 1986. – 304 с.
8. Каталитические теплофикационные устройства для решения экологических и энергетических проблем / В.Н. Пармон, З.Р. Исмагилов, В.А. Кириллов, А.Д. Симонов // Катализ в промышленности. – 2002. – № 3. – С. 20–29.
9. Опыт эксплуатации водогрейных котлов с каталитическим сжиганием жидкого и твердого топлива в псевдоожиженном слое / А.Д. Симонов, Н.А. Языков, А.С. Афлятунов, И.А. Федоров, В.А. Яковлев, В.Н. Пармон // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 19 (159). – С. 70–85.
10. Industrial experience of heat supply by catalytic installations / A.D. Simonov, N.A. Yazykov, N.A. Vedyakin, G.A. Lavrov, V.N. Parmon // Catalysis Today. – 2000. – № 60. – P. 139–145.
11. Features of sulfur oils catalytic combustion in fluidized bed / N.A. Yazykov, Yu.V. Dubinin, A.D. Simonov, S.I. Reshetnikov, V.A. Yakovlev // Chemical Engineering Journal. – 2016. – V. 283. – P. 649–655.
12. Multiphase catalytic reactors: theory, design, manufacturing and application / Ed. by Z.I. Önsan, A.K. Avci. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2016. – 381 p.
13. Larichev Yu.V., Yeletsy P.M., Yakovlev V.A. Study of silica templates in the rice husk and the carbon-silica nanocomposites produced from rice husk // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2015. – V. 87. – P. 58–63.
14. Получение активированного угля пиролизом рисовой шелухи Вьетнама / В.В. Коробочкин, М.Х. Нгуен, Н.В. Усольцева, В.Т. Нгуен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 6–15.
15. Synthesis of mesoporous carbons by leaching out natural silica templates of rice husk / P.M. Yeletsy, V.A. Yakovlev, M.S. Mel'gunov, V.N. Parmon // Microporous and Mesoporous Materials. – 2009. – V. 121. – P. 34–40.
16. Rice Husk Derived Activated Carbon/Polyaniline Composites as Active Materials for Supercapacitors / M.V. Lebedeva, A.B. Ayupov, P.M. Yeletsy, V.N. Parmon // International Journal of Electrochemical Science. – 2018. – V. 13. – P. 3674–3690.
17. Рачковская Л.Н. Углеродминеральные сорбенты для медицины. – Новосибирск: СО РАНХН, 1996. – 220 с.
18. Биологические свойства сорбентов и перспективы их применения / Ю.И. Бородин, В.И. Коненков, В.Н. Пармон, М.С. Любарский, Л.Н. Рачковская, Н.П. Бгатов, А.Ю. Летягин // Успехи современной биологии. – 2014. – Т. 134. – № 3. – С. 236–248.
19. Модифицированные сорбенты для практического здравоохранения / Л.Н. Рачковская, А.Ю. Летягин, В.А. Бурмистров, М.А. Королев, Н.Е. Гельфонд, Ю.И. Бородин, В.И. Коненков // Сибирский научный медицинский журнал. – 2015. – Т. 35. – № 2. – С. 47–54.
20. Чибисова Н.В. Практикум по экологической химии. – Калининград: Изд-во Калининградского университета, 1999. – 94 с.

Поступила 21.11.2018 г.

#### **Информация об авторах**

**Языков Н.А.**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

**Симонов А.Д.**, кандидат химических наук, ведущий инженер лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.



UDC 66.096.5: 62–971.2; 66.094.3.097

## CATALYTIC CO-COMBUSTION OF SOOT AND HYDROGEN IN FLUIDIZED BED

Nikolay N. Yazykov<sup>1</sup>,  
yazykov@catalysis.ru

Alexandr D. Simonov<sup>1</sup>,  
simonov@catalysis.ru

<sup>1</sup> Borekov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
5, Acad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to neutralize the emissions of soot and hydrogen from furnaces for sorbents carbon coating, which are mainly burned in the fire mode. This leads to formation of thermal nitrogen oxides and does not provide complete combustion of soot.

**The aim** of the research is to determine the optimum conditions of co-combustion of the butadiene pyrolysis products in the fluidized bed of deep oxidation catalyst of real emissions of soot and hydrogen mixture from the furnace for sorbents carbon coating.

**Objects:** real emissions of a mixture of soot and hydrogen from the furnace for sorbents carbon coating.

**Methods:** chromatographic analysis of flue gases from the reactor with a fluidized layer of the catalyst after combustion of the mixture of soot and hydrogen, photocolometric gas analysis on the content of nitrogen oxides using Griess–Ilosvay reagent, gravimetric method for determining soot emissions. The specific surface area of soot was determined on the basis of low-temperature nitrogen adsorption isotherm data.

**Result.** The authors have determined the optimum conditions of co-combustion of butadiene pyrolysis products in the fluidized bed of deep oxidation catalyst of real emissions of the mixture of soot and hydrogen from the furnace for sorbents carbon coating. It is shown that during the catalytic co-combustion of soot and hydrogen in the fluidized bed of the industrial catalyst IC-12-70 almost complete combustion of hydrogen occurs at a 550 °C, and the degree of carbon burn-off in the form of soot reaches a value of not less than 99,9 %. Emissions of harmful substances are insignificant: NO<sub>x</sub> is not more than 4,5 mg/m<sup>3</sup>, CO is not more than 0,037 vol. %.

### Key words:

Fluidized bed, catalyst, hydrogen, soot, carbon, co-combustion, carbon-mineral sorbent.

This work was carried out within the framework of budget project no. 0303–2016–0012 for Borekov Institute of Catalysis.

### REFERENCES

- Knorre G.F. *Topochnye protsessy* [Combustion processes]. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1951. 328 p.
- Kantorovich V.B. *Osnovy teorii goreniya i gazifikatsii tverdogo topliva* [Fundamentals of the theory of combustion and gasification of solid fuels]. Moscow, AS USSR Publ. house, 1958. 601 p.
- Kuznetsov A.V., Butakov E.B. A study of the influence of mechanical activation on the combustion of coal fuel. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 37–44. In Rus.
- Kubin M. *Szhiganie tverdogo topliva v kipyashchem sloe* [Solid fuel combustion in the fluidized bed]. Moscow, Energoizdat Publ., 1987. 112 p.
- Oka S.N. *Fluidized Bed Combustion*. New York, Basel, Marcell Dekker, Ink, 2004. 590 p
- Yates J.G. *Fundamentals of fluidized bed chemical processes*. London, Butterworths, 1983. 289 p.
- Borekov G.K. *Geterogenny kataliz* [Heterogeneous catalysis]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 304 p.
- Parmon V.N., Ismagilov Z.R., Kirillov V.A., Simonov A.D. Catalytic heating devices for solving environmental and energy problems. *Catalysis in Industry*, 2002, no. 3, pp. 20–29. In Rus.
- Simonov A.D., Yazykov N.A., Aflyatunov A.S., Fedorov I.A., Yakovlev V.A., Parmon V.N. The experience of operating boilers with catalytic combustion of liquid and solid fuels in fluidized bed. *Alternative Energy and Ecology*, 2014, no. 19 (159), pp. 70–85. In Rus.
- Simonov A.D., Yazykov N.A., Vedyakin P.I., Lavrov G.A., Parmon V.N. Industrial experience of heat supply by catalytic installations. *Catalysis Today*, 2000, no. 60, pp. 139–145.
- Yazykov N.A., Dubinin Yu.V., Simonov A.D., Reshetnikov S.I., Yakovlev V.A. Features of sulfur oils catalytic combustion in fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 283, pp. 649–655.
- Multiphase catalytic reactors: theory, design, manufacturing and application*. Eds. Z.I. Önsan, A.K. Avci. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2016. 381 p.
- Larichev Yu.V., Yeletsy P.M., Yakovlev V.A. Study of silica templates in the rice husk and the carbon-silica nanocomposites produced from rice husk. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2015, vol. 87, pp. 58–63.
- Korobochkin V.V., Nguyen M.H., Usoltseva N.V., Nguyen V.T. production of activated carbon by pyrolysis of rice husk of Vietnam. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 6–15. In Rus.
- Yeletsy P.M., Yakovlev V.A., Mel'gunov M.S., Parmon V.N. Synthesis of mesoporous carbons by leaching out natural silica templates of rice husk. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, vol. 121, pp. 34–40.
- Lebedeva M.V., Ayupov A.B., Yeletsy P.M., Parmon V.N. Rice Husk Derived Activated Carbon/Polyaniline Composites as Active Materials for Supercapacitors. *International Journal of Electrochemical Science*, 2018, vol. 13, pp. 3674–3690.
- Rachkovskaya L.N. *Uglerodmineralnye sorbenty dlya meditsyny* [Carbon-mineral sorbents for medicine]. Novosibirsk, Russian Academy of agricultural Sciences Publ., 1996. 220 p.
- Borodin Yu.I., Konenkov V.I., Parmon V.N., Lyubarsky M.S., Rachkovskaya L.N., Bgatova N.P., Letyagin A.Yu. Biological properties of sorbents and prospects of their application. *Successes of Modern Biology*, 2014, vol. 134, no. 3, pp. 236–248. In Rus.

19. Rachkovskaya L.N., Letyagin A.Yu., Burmistrov V.A., Korolev M.A., Gelfond N.E., Borodin Y.I., Konenkov V.I. Modified sorbents for practical public health. *Siberian Scientific Medical Journal*, 2015. vol. 35, no. 2, pp. 47–54. In Rus.
20. Chibisova N.V. *Praktikum po ekologicheskoy khimii* [Workshop on environmental chemistry]. Kaliningrad, Kaliningrad University Publ. house, 1999. 94 p.

*Received: 21 November 2018.*

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

**Nikolay N. Yazykov**, Cand. Sc., scientist worker, Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Alexandr D. Simonov**, Cand. Sc., leading engineer, Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 621.577.001.5

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА

Максимов Вячеслав Иванович<sup>1</sup>,  
elf@tpu.ru

Салум Амер<sup>1</sup>,  
amer@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Использование низкопотенциальной энергии водоемов с помощью теплонасосных установок в условиях низких температур окружающей среды – воздуха (период времени «осень–зима–весна»), характерных для большей части территории России, связано с возможным обмерзанием трубок испарителя теплонасосных установок, что приводит к изменению режима его работы. Анализ основных закономерностей процессов работы теплообменного оборудования, а также оценка энергоэффективности теплонасосных установок в условиях образования слоя льда на рабочих поверхностях испарителя до настоящего времени не проводились.

**Цель:** экспериментальное изучение основных закономерностей процессов образования льда на рабочих поверхностях трубок испарителя теплонасосных установок, погруженных в воду с температурой, соответствующей условиям осеннего, зимнего и весеннего периодов года для большинства природных водоемов, расположенных в РФ, а также анализ основных характеристик работы ТНУ в таких условиях.

**Объект:** парокомпрессионный тепловой насос, работающий в условиях образования слоя льда на рабочих поверхностях трубок испарителя, помещённых в резервуар с водой, температура которой ниже 280 К.

**Методы.** Значения температур в характерных точках поверхности трубки теплообменника-испарителя и воды, находящейся в этой области, измерялись 15 хромель-алюмелевыми термопреобразователями (ХА термопары), подключенными через АЦП к компьютеру, и регистрировались в реальном времени. На основании полученных данных проводился расчет коэффициента преобразования теплонасосной установки по известной методике.

**Результаты.** Выделен эффект образования льда, толщиной до 10 мм, на поверхности трубок испарителя при температурах воды ниже 280 К и времени работы установки до 8000 с. Установлено, что этот слой существенно снижает интенсивность передачи теплоты в зону испарения хладагента. Эффективность работы теплонасосной установки при этом снижается до минимума. По результатам выполненных экспериментов сделан вывод о возможности работы теплонасосных установок при частичном покрытии трубки испарителя льдом. Сформулирована гипотеза о механизме процессов теплопереноса и фазовых превращений, протекающих вблизи трубок теплоносителя теплонасосной установки, при температурах воды менее 286 К. Результаты выполненных исследований являются базой для обоснования условий эффективного применения теплонасосных установок в регионах с низкими температурами воздуха в период осени, зимы и весны.

### Ключевые слова:

Тепловой насос, теплоснабжение, альтернативная система отопления, источник низкопотенциальной энергии, эффективность.

### Введение

Геотермальная энергия является неиссякаемым ресурсом теплоты на многие годы [1, 2]. Но её извлечение представляет собой сложную техническую проблему, для решения которой необходимы очень большие финансовые ресурсы. Наиболее доступной в настоящее время является энергия водоемов (теплота, аккумулированная водой), использование которой возможно с применением теплонасосных установок [3–12]. Использование низкопотенциальной энергии водоемов с помощью теплонасосных установок (ТНУ) многие годы привлекает внимание исследователей и инженеров [1–14]. Разработаны и эксплуатируются десятки ТНУ в разных регионах планеты. В РФ известны единичные примеры использования таких «генераторов» тепловой энергии [7–11]. Одной из причин малого числа работающих ТНУ является, возможно, недостаточная изученность ряда процессов, протекающих в водоемах и в ТНУ, в условиях низких температур окружающей среды – воздуха

(период времени «осень–зима–весна»), характерных для большей части территории России.

Следует отметить, что, в соответствии со своим целевым назначением, (выработка тепловой энергии) ТНУ должны работать в холодный период года, когда необходимо отопление жилых и производственных помещений. Оценка же эффективности работы ТНУ в диапазоне изменения температур низкопотенциального источника тепла, соответствующих зимнему периоду на территории основной части РФ, до настоящего времени не проводилась.

По результатам экспериментов процесса теплопереноса в слое холодной воды, окружающей трубку испарителя, установлена возможность образования, в определённых условиях, слоя льда на поверхности этой трубки [9–20]. Представляет интерес анализ основных закономерностей процессов работы трубок испарителя и энергоэффективности ТНУ в условиях образования слоя льда на рабочих поверхностях испарителя.

Цель работы – экспериментальное изучение основных закономерностей процессов образования льда на рабочих поверхностях трубок испарителя ТНУ, погруженных в воду с температурой, соответствующей условиям осеннего, зимнего и весеннего периодов года для большинства природных водоемов, расположенных в РФ, и анализ основных характеристик работы теплонасосной установки с покрытыми льдом трубками испарителя.

#### Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились с использованием парокомпрессионной теплонасосной установки (рис. 1, а). В качестве теплоносителя использовался хладон R134a.

Экспериментальный блок, использованный для изучения процессов образования льда на поверхности испарителя, представлял собой заполненный водой параллелепипед размерами  $0,22 \times 0,18 \times 0,25$  м. В него помещалась медная трубка (рис. 1, б) с внутренним диаметром 0,008 м, толщиной 0,0015 м и длиной 3,11 м. Материал стенок блока – пластик толщиной 2 мм, изолированный слоем пенополистирола толщиной 70 мм. Начальная температура воды варьировалась в диапазоне от 280 до 286 К. Экспериментальный стенд находился в помещении с температурой 294 К.

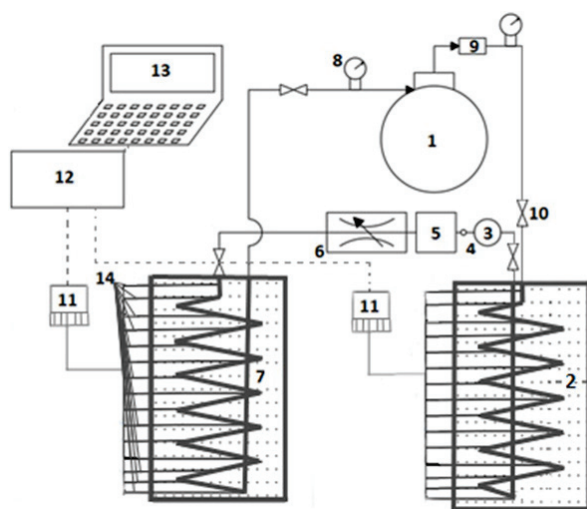
Измерения толщины льда ( $\delta$ ) в характерных точках трубки испарителя (табл. 1) проводились цифровым микрометром с погрешностью не более

0,001 мм. Этот процесс продолжался 2 мин. Показатели температуры в экспериментальном блоке фиксировались с использованием 15 хромель-алюмелевых термопреобразователей (ХА термопар) с размером рабочего спая 0,1 мм, подключенных к аналого-цифровому преобразователю с разрешающей способностью 16 бит и встроенным датчиком температуры холодного спая. Термопары (ТП) закреплялись на медной трубке по всей длине теплообменника-испарителя и конденсатора (табл. 2), а также в межтрубном пространстве (термопары № 1–15) по всей высоте экспериментального блока с шагом по координате  $z=0,0015$  м, в сечении  $x=0,11$  м,  $y=0,9$  м.

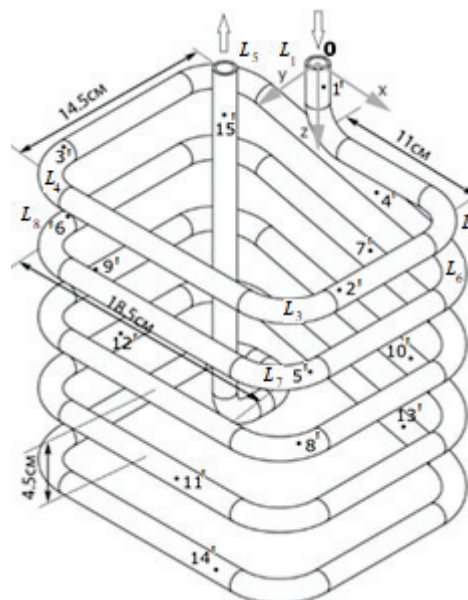
Таблица 1. Координаты характерных точек измерения толщины льда на поверхности трубного элемента испарителя

Table 1. Coordinates of the characteristic points in which the thickness of formed ice on the evaporator pipe surface are measured

Обозначение Symbol	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$
Длина отрезка трубки, м Tube part length, m	0,115	0,26	0,445	0,59	0,775	0,92	1,105	
Координаты, м Coordinates, m	$x$	0,115	0,115	-0,07	-0,07	0,115	0,115	-0,07
	$y$	0	0,145	0,145	0	0	0,145	0,145
	$z$	0,045				0,09		



а/а



б/б

Рис. 1. а) принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – компрессор; 2 – конденсатора; 3 – фильтр; 4 – смотровое окно; 5 – осушитель; 6 – дроссель; 7 – испаритель; 8 – манометр; 9 – расходомер; 10 – задвижка; 11 – аналого-цифровой преобразователь; 12 – адаптер сети; 13 – компьютер; 14 – термопары; б) трубка элемента теплообменника-испарителя: точками обозначены места расположения термопар на поверхности трубки испарителя, 1'–15' их номера (табл. 2)

Fig. 1. а) schematic diagram of the experimental unit: 1 is the compressor; 2 is the condenser container; 3 is the filter; 4 is the viewing eye; 5 is the drier; 6 is the capillary tube; 7 is the evaporator chamber; 8 is the manometer; 9 is the flow meter; 10 is the valve; 11 is the analog-digital converter; 12 is the network adapter; 13 is the computer; 14 are the thermocouples; б) tube of the heat exchanger element-evaporator: dots indicate the thermocouples locations on the evaporator tube surface, 1'–15' are their numbers (Table 2)



Таблица 2. Координаты расположения термопар на поверхности трубного элемента испарителя

Table 2. Coordinates for thermocouples on the evaporator pipe surface

Номер термопары Thermocouple number	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	11'	12'	13'	14'	15'
$x, \text{ м (m)}$	0	0,11	-0,075	0,03	0,11	-0,075	0	0,11	-0,075	0,055	0,085	-0,075	0,08	0,055	0
$y, \text{ м (m)}$	0	0,095	0,125	0	0,145	0,1	0	0,145	0,1	0	0,145	0,075	0	0,145	0,075
$z, \text{ м (m)}$	0,02	0,045	0,045	0,09	0,09	0,09	0,135	0,135	0,135	0,18	0,18	0,18	0,225	0,225	0,02

Для связи аналого-цифрового преобразователя с персональным компьютером использовался адаптер сети, обеспечивающий полную гальваническую развязку между устройствами. В качестве средства обработки результатов измерений применялся программный комплекс на базе *National Instruments LabVIEW*, специально разработанный для такого типа измерений. Значения температур регистрировались в реальном времени с сохранением полученных данных. Суммарная относительная систематическая погрешность всех элементов системы регистрации определения значений температур не превышала 4,6 % во всем диапазоне изменения параметров. Случайная погрешность составляла менее 5 %.

#### Результаты экспериментальных исследований и обсуждение

Основные эксперименты проведены при температурах воды от 280 до 286 К [11], которые соответствуют диапазону температур воды в водоемах многих регионов РФ в осенний, зимний и весенний периоды времени.

Представлены значения температур, толщины льда в характерных точках поверхности трубки теплообменника-испарителя и воды, находящейся в этой области (рис. 2–6), измеренных в результате проведения экспериментальных исследований при начальной температуре воды  $T_0=280$  К (вариант 1) и  $T_0=286$  К (вариант 2).

В начальный период времени (до 1000 сек) происходит резкое понижение температуры до 264 К (температура кипения фреона при давлении испарителя) на участке поверхности трубки теплообменника (термопары 1–3 рис. 2, 3), прилегающем к области входа хладагента в испаритель. Это связано с тем, что основной процесс испарения интенсивно проходит именно на этом достаточно коротком отрезке трубы. На этом же участке интенсивно образуется лёд на внешней поверхности трубки ( $L_1-L_3$  рис 3).

Со временем интенсивность процесса фазового перехода на этом участке уменьшается, и показатели температуры поверхности повышаются (до 271 К при  $T_0=280$  К и до 272 К при  $T_0=286$  К). На остальной поверхности испарителя они постепенно понижаются (термопары 4'–15' рис. 2, 3), так как зона интенсивного испарения хладагента расширяется по длине трубки, что приводит к образованию льда на большей части её стенки ( $L_4-L_{15}$  рис. 4, 5). Значения температуры воды вблизи трубки испарителя понижаются, и формируется режим температурной стратификации жидкости (рис. 6, 7). При этом перепад температур по высоте резервуара может достигать 2–3 градусов (рис. 6, 7,  $t=2000$  с). Со временем толщина льда продолжает увеличиваться (рис. 4, 5), соответственно, эффективность теплообмена между водой и хладагентом существенно снижается (трубка «теплоизолируется»), и интенсивность испарения

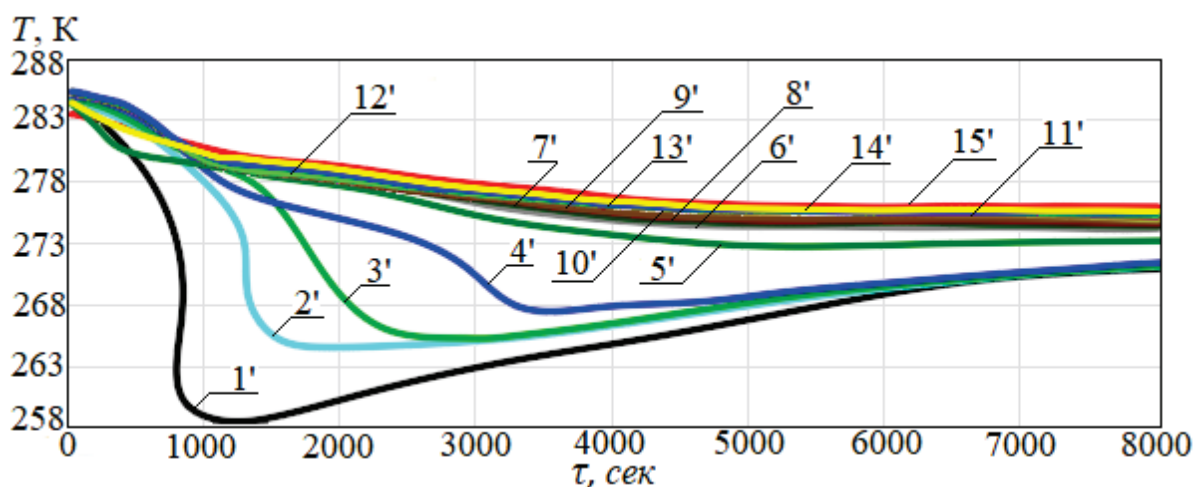


Рис. 2. Зависимости температур в характерных точках поверхности трубки испарителя от времени: 1'–15' номера термопар, расположенных на поверхности трубки испарителя в соответствии с табл. 1 ( $T_0=280$  К)

Fig. 2. Time dependences of temperature of evaporator pipe surface in characteristic points: 1'–15' are the numbers of thermocouples located on the surface of the evaporator tube in accordance with the Table 1 ( $T_0=280$  К)

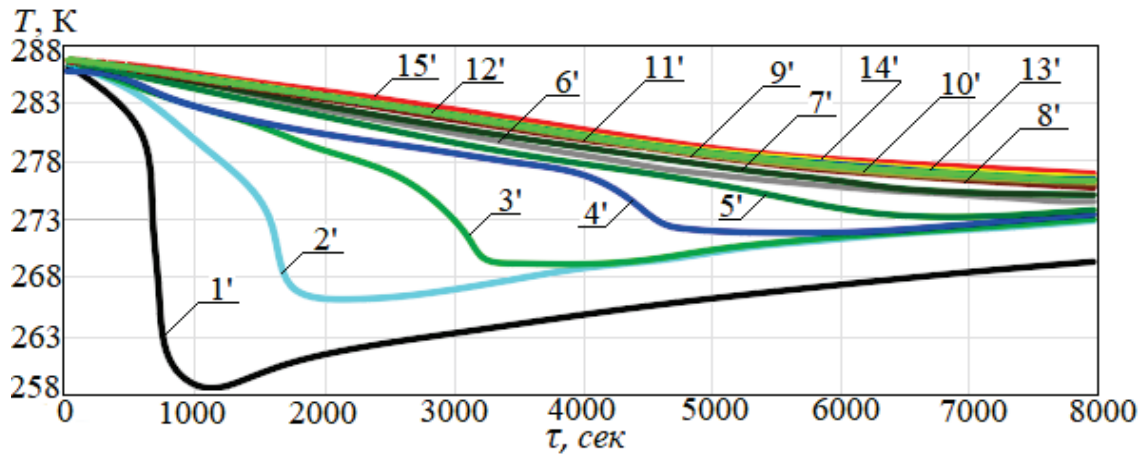


Рис. 3. Зависимости температур в характерных точках поверхности трубы испарителя от времени: 1'–15' номера термодатчиков, расположенных на поверхности трубы испарителя в соответствии с табл. 1 ( $T_0=286$  K)

Fig. 3. Time dependence of temperature for the evaporator pipe surface in characteristic points: 1'–15' are the numbers of thermocouples located on the surface of the evaporator tube in accordance with Table 1 ( $T_0=286$  K)

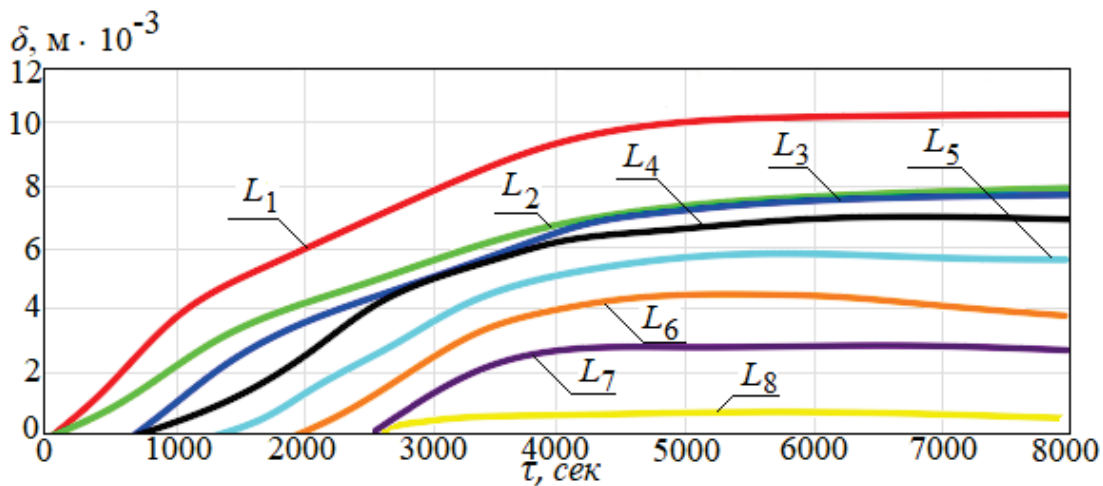


Рис. 4. Изменение со временем толщины льда на трубе испарителя в характерных точках (табл. 2) при  $T_0=280$  K

Fig. 4. Ice thickness changes on the evaporator pipe in characteristic points (Table 2) at  $T_0=280$  K

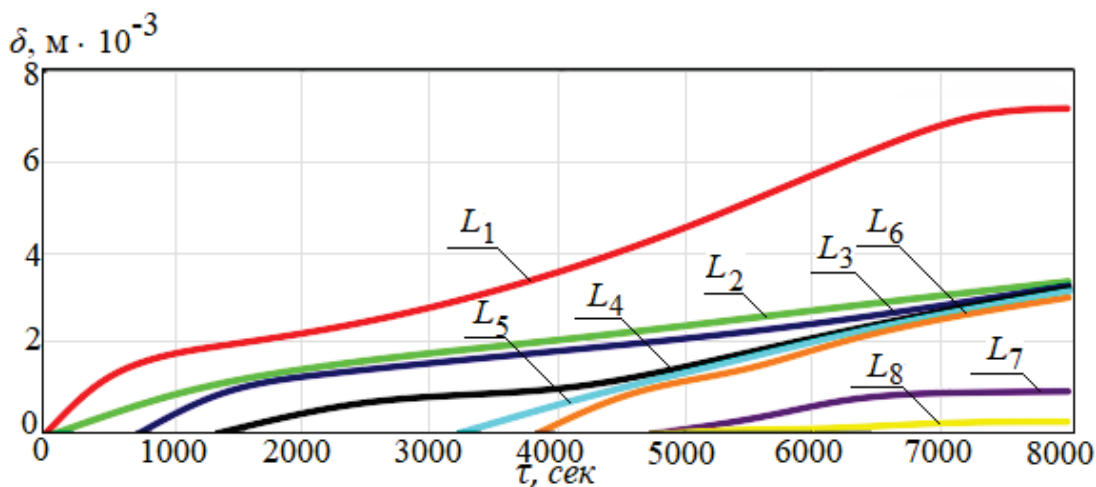


Рис. 5. Изменение со временем толщины льда на трубе испарителя в характерных точках (табл. 2) при  $T_0=286$  K

Fig. 5. Ice thickness changes on the evaporator pipe in characteristic points (Table 2) at  $T_0=286$  K

хладагента падает. В результате скорость образования льда уменьшается. Выяснилось (рис. 4, 5), что она существенно зависит от начальной температуры воды в испарителе.

При  $T_0=280$  К толщина слоя льда увеличивается достаточно быстро практически по всей длине трубки испарителя и уже через 5000 сек на начальном участке достигает 10 мм (рис. 4). Можно отметить, что при коэффициенте теплопроводности около 2 Вт/м·К вода в замороженном состоянии становится хорошим теплоизолятором. Так, например, при значении  $\delta=10$  мм термическое сопротивление стенки трубки испарителя увеличивается примерно в 600 раз, по сравнению с начальным значением (т. к. трубка покрыта льдом).

Толщина образовавшегося льда в первые 2000 с на всей поверхности трубки меньше, в среднем на 60 % при  $T_0=286$  К, по сравнению с её показателями при  $T_0=280$  К. Она достигла своего максимального значения (6,9 мм) через 7000 сек после начала работы установки.

Установлено, что при понижении температуры воды до 277 К вблизи трубки испарителя формируется режим обратной температурной стратификации воды (рис 6). Через определенное время (7000 с) значения толщины льда на трубке испарителя практически не изменяются.

С целью обоснования эффективности работы ТНУ в условиях образования льда на трубке испарителя рассчитаны значения коэффициента преобразования ( $\eta$ ) (для периода работы установки до 8000 с).

Вид зависимости  $\eta(t)$  для разных начальных температур воды вблизи трубки испарителя (рис. 8) аналогичен. Заметно увеличение ( $\eta$ ) через 2500 с, от 0 до 2,1–2,3. Затем происходит его снижение до 1,2–1,3 в связи с образованием на поверхности трубки испарителя слоя льда, существенно уменьшающего интенсивность теплообмена между хладагентом и водой.

Приведенные распределения во времени характеристик работы экспериментальной теплонасос-

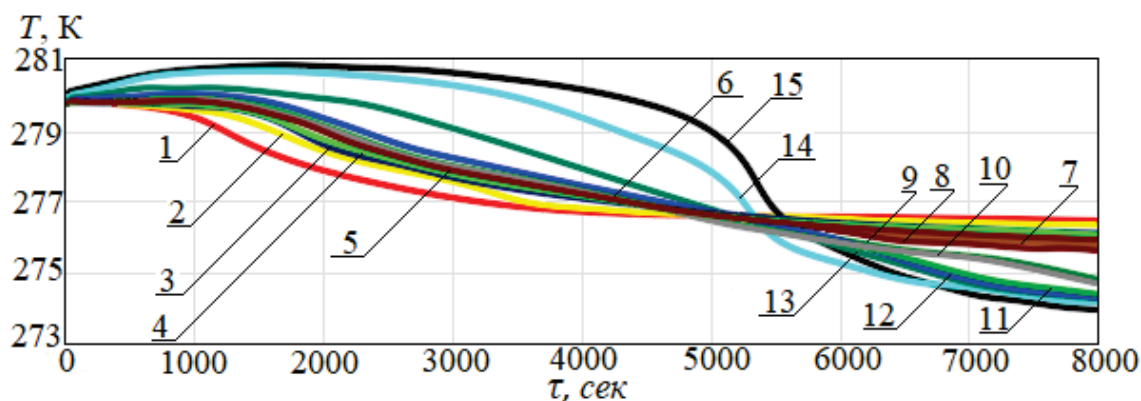


Рис. 6. Изменение со временем температуры воды вблизи трубки испарителя (1'–15' – номера термодатчиков, расположенных в межтрубном пространстве,  $T_0=280$  К)

Fig. 6. Change of water temperature near the evaporator pipe with time (1'–15' are the numbers of thermocouples located in the water between evaporator pipes,  $T_0=280$  K)

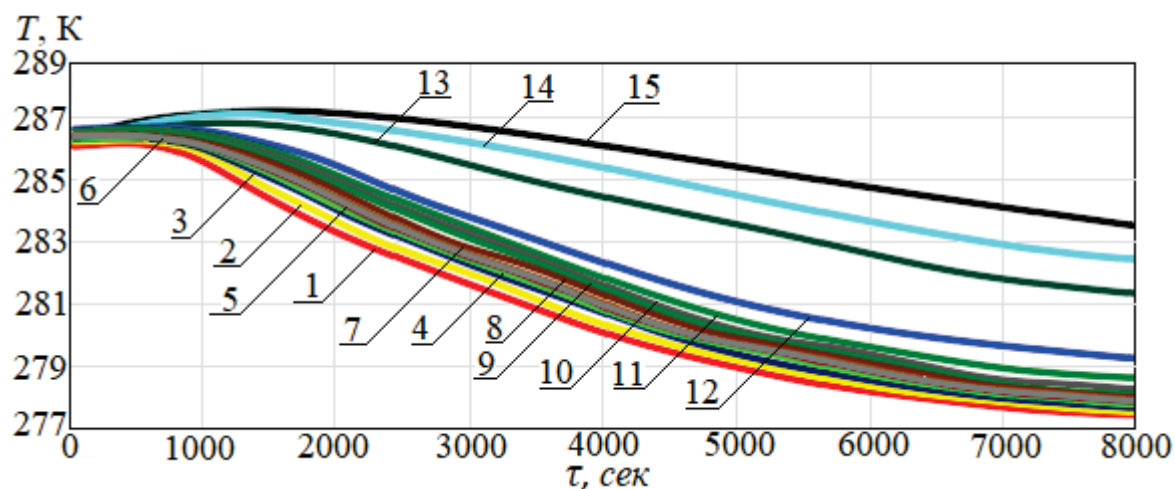


Рис. 7. Изменение со временем температуры воды (1'–15' – номера термодатчиков, расположенных в межтрубном пространстве,  $T_0=286$  К)

Fig. 7. Change of water temperature in the evaporator water container with time (1'–15' are the numbers of thermocouples located in the water between evaporator pipes,  $T_0=286$  K)

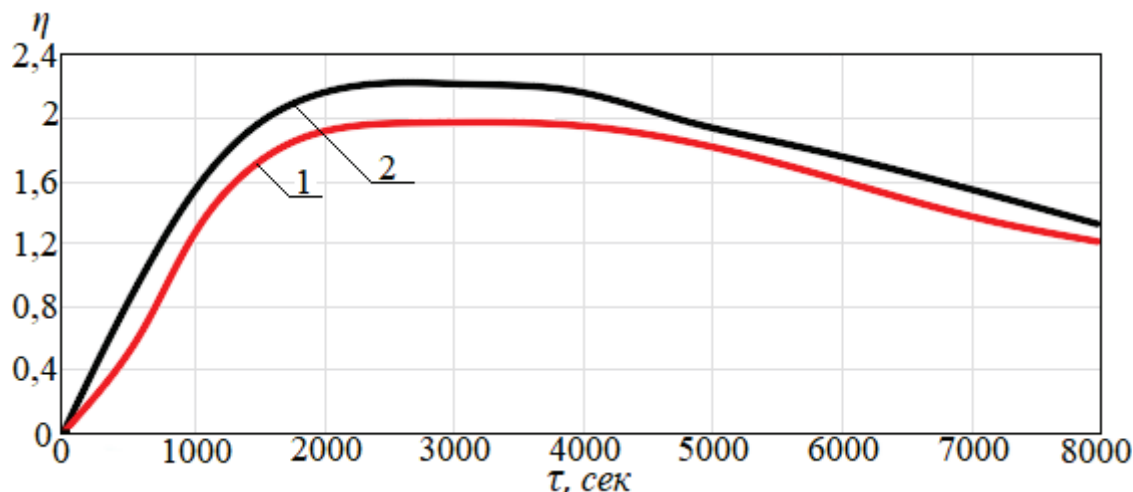


Рис. 8. Зависимость коэффициента преобразования теплонасосной установки от времени при различной начальной температуре воды вблизи трубки испарителя (1 – 280 К, 2 – 286 К)

Fig. 8. Time dependence of the heat pump unit conversion ratio at different initial values of water temperatures near the evaporator pipe (1 – 280 K, 2 – 286 K)

сной установки (рис. 2–7) получены для ограниченного по объёму массива воды, температура которой изменялась только вследствие работы испарителя ТНУ.

Результаты выполненных экспериментальных исследований показывают, что при температурах низкопотенциального источника теплоты (воды) ниже 280 К повышается скорость образования льда и эффективность работы теплонасосных установок значительно снижается. Температура воды в водоемах большей части территории РФ в зимний период времени не превышает 280 К, поэтому можно сделать вывод о низкой эффективности работы теплонасосных установок на большей части территории России в зимний (по крайней мере) период времени при использовании низкопотенциальной теплоты водоемов с непроточной водой (озёра, пруды, водохранилища). В этой связи представляют интерес дальнейшие исследования эффективности работы теплонасосных установок в зимний период с использованием теплоты воды рек, потому что характеристики работы испарителей ТНУ в режиме вынужденной конвекции воды – источника низкопотенциального тепла, могут отличаться от условий функционирования тепловых насосов в водоемах с непроточной водой.

#### Заключение

Экспериментально установлены значения температур на поверхности трубки теплообменника-

испарителя (основного узла теплонасосной установки), водной среды по высоте резервуара испарителя, а также толщины образовавшегося льда на её стенке.

Выявлены основные закономерности процессов кристаллизации воды на поверхности испарителя в зависимости от начальных условий времени работы ТНУ.

Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований дает основания для вывода о том, что работа теплонасосных установок в условиях климата, соответствующего большей части Российской Федерации (умеренно низкие температуры в осенний, зимний и весенний периоды времени), в водоемах с непроточной водой (озера, водохранилища, пруды и др.) будет неэффективна. Образовавшийся лёд на поверхности трубки испарителя со стороны низкопотенциального источника энергии (воды) снижает интенсивность процесса теплообмена между фреоном и водой. При этом чем меньше температура воды низкопотенциального источника энергии, тем ниже коэффициент преобразования теплонасосной установки. Поэтому использование ТНУ в водоемах с водой при низких (276–280 К) температурах практически нецелесообразно.

Исследование проведено в рамках программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров (проект ВИУ-ИШЭ-300/2018).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shenghua Z., Xiaokai X. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump // *Applied – Thermal Engineering*. – 2016. – V. 112. – P. 200–207. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111632378X> (дата обращения: 22.11.2018).
2. Wang Y. Analysis on the practical use of open-loop surface water source heat pump systems (SWHP) // *Chongqing University*. – 2011. – 30 p. URL: [http://www.igshpa.okstate.edu/membership/members\\_only/proceedings/2011/100611-0330-A-Yong%20Wang%20%20\(laptop\).pdf](http://www.igshpa.okstate.edu/membership/members_only/proceedings/2011/100611-0330-A-Yong%20Wang%20%20(laptop).pdf) (дата обращения: 22.11.2018).
3. Morton A.C. Assessing the performance of a reservoir-based water source heat pump: a thesis of the degree Master of Science. – Glasgow, 2013. – 89 p. URL: [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc\\_2013/Morton.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2013/Morton.pdf) (дата обращения: 22.11.2018).
4. Surface Water Source Heat Pump Air Conditioning System Simulation and Operation Performance Analysis / N. Lv, Q. Zhang, D. Wu, Z. Chen // *Procedia Engineering*. – 2016. – V. 121. – P. 1880–1886. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815029987> (дата обращения: 22.11.2018).
5. Schibuola L., Scarpa M. Experimental analysis of the performances of a surface water source heat pump // *Energy and Buildings*. – 2015. – V. 113. – P. 182–188. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815304849> (дата обращения: 22.11.2018).
6. Demyanovich N.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Numerical simulation of hydrodynamics and heat transfer in the technological reservoir with the heat pump // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – V. 92: Thermophysical Basis of Energy Technologies (TBET-2016): Proc. of the Conference. – Tomsk, Russia, October 26–28, 2016. – 01067, 5 p. URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/06/mateconf\\_tibet2017\\_01067/mateconf\\_tibet2017\\_01067.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/06/mateconf_tibet2017_01067/mateconf_tibet2017_01067.html) (дата обращения: 22.11.2018).
7. The effectiveness of low-grade geothermal heat usage under the conditions of the Russian climate / G.P. Vasilyeva, N.V. Peskova, V.F. Gornova, M.V. Kolesova // *Geothermics*. – 2016. – V. 62. – P. 93–102. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650516300219> (дата обращения: 22.11.2018).
8. Батухтин А.Г., Иванов С.А., Кобылкин М.В. Применение водных теплонасосных установок с неклассическим источником низкопотенциальной энергии для компенсации нагрузки горячего водоснабжения // *Промышленная энергетика*. – 2015. – № 3. – С. 18–21.
9. Maksimov V.I., Chernyshev V.S. Conditions and characteristics of water crystallization on the working surface of evaporator heat pumps in reservoirs with low temperatures // *Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy: MATEC Web of Conferences*. – Tomsk, Russia, 22–23 April, 2015. – V. 23. – 8 p. URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2015/04/mateconf\\_tsotr2015\\_01051/mateconf\\_tsotr2015\\_01051.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2015/04/mateconf_tsotr2015_01051/mateconf_tsotr2015_01051.html) (дата обращения: 22.11.2018).
10. Дидиков А.Е. Анализ экономических и экологических аспектов применения тепловых насосов для утилизации низкопотенциального тепла очистных сооружений // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. – 2016. – № 1. – С. 92–98.
11. Шамигулов П.В., Дорошенко Е.В. Определение оптимальной глубины закладки горизонтального теплообменника теплового насоса // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2015. – № 17–18 (181–182). – С. 48–53.
12. Piljae I., Xiaobing L., Henderson H. Operational Performance Characterization of a Heat Pump System Utilizing Recycled Water as Heat Sink and Heat Source in a Cool and Dry Climate // *Energies*. – 2018. – № 11. – 15 p. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/211> (дата обращения: 22.11.2018).
13. Amoabeng K.O., Lee K.H. A study on the performance characteristics of a testing facility for a water-to-water heat pump // *International Journal of Refrigeration*. – 2018. – V. 86. – P. 113–126. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717304565> (дата обращения: 22.11.2018).
14. Simulation and preliminary experimental study on the sea water source tandem heat pumps / K. Chang, Y. Baik, B. Kang, H. Yoon // *2012 Oceans – Yeosu*. – Yeosu, South Korea, 21–24 May 2012. – 10 p. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6263559> (дата обращения: 22.11.2018).
15. Kawalecki T.A., Cybulski A. Experimental and Numerical Investigations of Natural convection in freezing water // *Center of mechanics*. – 2015. – 10 p. URL: <http://fluid.ippt.pan.pl/papers/kielce96.pdf> (дата обращения: 22.11.2018).
16. Maksimov V.I., Salum A. Convection influence on ice formation process on the evaporator heat pump pipes // *MATEC Web of Conferences: Smart Grids 2017: the Fifth International Youth Forum*. – Tomsk, Russia, 22–23 April, 2017. – V. 141. – 5 p. URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/55/mateconf\\_smartgrids2017\\_01001.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/55/mateconf_smartgrids2017_01001.pdf) (дата обращения: 22.11.2018).
17. Analytical solutions for predicting thermal plumes of groundwater heat pump systems / W. Pophillat, G. Attard, P. Bayer, J. Hecht-Méndez, P. Blum // *Renewable Energy*. – 2018. – 12 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118309455> (дата обращения: 22.11.2018).
18. Experimental study on the thermal performance of multi-row helically coiled tube heat exchanger for surface water-source heat pump / C. Zhou, L. Ni, Y. Ke, Y. Yao // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – V. 149. – P. 1274–1286. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118343412> (дата обращения: 22.11.2018).
19. Zou S., Xie X. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 112. – С. 200–207. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111632378X> (дата обращения: 22.11.2018).
20. Zhou C., Ni L., Yao Y. Heat transfer analysis of multi-row helically coiled tube heat exchangers for surface water-source heat pump // *Energy*. – 2018. – V. 163. – P. 1032–1049. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218317262> (дата обращения: 22.11.2018).

Поступила 30.01.2019 г.

## Информация об авторах

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

**Салум А.**, аспирант научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.577.001.5

## FEATURES OF GEOTHERMAL ENERGY USE WITH APPLICATION OF HEAT PUMP UNITS UNDER LOW AIR TEMPERATURE CONDITIONS

**Vyacheslav I. Maksimov<sup>1</sup>,**  
elf@tpu.ru

**Amer Saloum<sup>1</sup>,**  
amer@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634534, Russia.

**The relevance.** The use of low-potential energy of water reservoirs with the help of heat pump stations in conditions of low ambient temperatures – air (time period «autumn–winter–spring»), characteristic for the most part of Russian territory, is related to possible freezing of evaporator pipes of heat pump stations, which leads to a change in its operation mode. The analysis of the basic laws of operation of heat exchange equipment, as well as the assessment of energy efficiency of heat pump stations under conditions of ice formation on the evaporator surfaces, have not been carried out before.

**The main aim** of the research is the experimental study of the main laws of ice formation on the working surfaces of heat pump evaporator pipes, surrounded by water with the temperature corresponding to the conditions of autumn, winter and spring periods for most natural water reservoirs in the Russian Federation, as well as an analysis for the main operating characteristics of the heat pump stations under such conditions.

**Object** of the research is a vapor compressor heat pump, operating under conditions of ice formation on the working surfaces of the evaporator pipes, surrounded by water with the temperature under 280 K.

**Methods.** Temperature values in characteristic points on the surface of the heat exchanger-evaporator pipe and water were measured by 15 chromel-alumel thermocouples (CA thermocouples) connected via ADC to a computer; these values were registered in experiment real time. Based on the data obtained, the heat pump coefficient of performance was calculated by a defined method.

**Results.** The authors have highlighted the effect of formation of ice with a thickness up to 10 mm on the surface of the evaporator pipes located in water with a temperature below 280 K and the device operation time up to 8000 s. It is established that this layer reduces significantly the intensity of heat transfer to the refrigerant in evaporation zone. The efficiency of the heat pump is reduced to a minimum. According to the experiments, it is concluded that the heat pump operation is possible with partial covering of evaporator pipe with ice. The authors stated the hypothesis on the mechanism of heat transfer processes and phase transformations occurring near the coolant pipes in water with temperatures lower than 286 K. The study results are the base to define the conditions of efficient use of heat pump in the territories with negative air temperatures during the autumn, winter and spring periods.

### Key words:

Heat pump, heat supply, alternative heating system, low-potential energy source, efficiency.

*The research was carried out within the Program of National Research Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement among the leading world Research and Educational centers (project VIU-ISH-300/2018).*

### REFERENCES

- Shenghua Z., Xiaokai X. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 112, pp. 200–207. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111632378X> (accessed 22 November 2018).
- Wang Y. *Analysis on the practical use of open-loop surface water source heat pump systems (SWHP)*. 2011, 30 p. Available at: [http://www.igshpa.okstate.edu/membership/members\\_only/proceedings/2011/100611-0330-A-Yong%20Wang%20%20\(laptop\).pdf](http://www.igshpa.okstate.edu/membership/members_only/proceedings/2011/100611-0330-A-Yong%20Wang%20%20(laptop).pdf) (accessed 22 November 2018).
- Morton A.C. *Assessing the performance of a reservoir-based water source heat pump*. A thesis of the degree Master of Science. Glasgow, 2013. 89p. Available at: [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc\\_2013/Morton.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2013/Morton.pdf) (accessed 22 November 2018).
- Lv N., Zhang Q., Wu D., Chen Z. Surface Water Source Heat Pump Air Conditioning System Simulation and Operation Performance Analysis. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 121, pp. 1880–1886. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815029987> (accessed 22 November 2018).
- Schibuola L., Scarpa M. Experimental analysis of the performances of a surface water source heat pump. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 113, pp. 182–188. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815304849> (accessed 22 November 2018).
- Demyanovich N.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A. Numerical simulation of hydrodynamics and heat transfer in the technological reservoir with the heat pump. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 92: *Thermophysical Basis of Energy Technologies (TBET-2016): Proc. of the Conference*. Tomsk, Russia, October 26–28, 2016. 01067, 5 p. Available at: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/06/mateconf\\_tibet2017\\_01067/mateconf\\_tibet2017\\_01067.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/06/mateconf_tibet2017_01067/mateconf_tibet2017_01067.html) (accessed 22 November 2018).
- Vasilyeva G.P., Peskova N.V., Gornova V.F., Kolesova M.V. The effectiveness of low-grade geothermal heat usage under the conditions of the Russian climate. *Geothermics*, 2016, vol. 62, pp. 93–102. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650516300219> (accessed 22 November 2018).
- Batukhtin A.G., Ivanov C.A., Kobylkin M.V. *Primenenie vodyanykh teplonasosnykh ustanovok s neklassicheskimi istochnikami nizkopotentsialnoy energii dlya kompensatsii nagruzki goryachego vodosnabzheniya* [Application of water heat pump plants with non-classical low-potential energy source for compensation with

- hot water supply systems]. *Promyshlennaya energetika*, 2015, no. 3, pp. 18–21.
9. Maksimov V.I., Chernyshev V.S. Conditions and characteristics of water crystallization on the working surface of evaporator heat pumps in reservoirs with low temperatures. *MATEC Web of Conferences. Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy*. Tomsk, Russia, 22–23 April, 2015. Vol. 23, 8 p. Available at: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2015/04/mateconf\\_tsotr2015\\_01051/mateconf\\_tsotr2015\\_01051.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2015/04/mateconf_tsotr2015_01051/mateconf_tsotr2015_01051.html) (accessed 22 November 2018).
10. Didikov A.E. Analiz ekonomicheskikh i ekologicheskikh aspektov primeneniya teplovykh nasosov dlya utilizatsii nizkopotentsialnogo tepla ochistnykh sooruzheniy [Analysis of economic and environmental aspects using heat pumps for disposal of low-grade heat treatment facilities]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskii menedzhment»*, 2016, no. 1, pp. 92–98.
11. Shamigulov P.V., Doroshenko E.V. Opredelenie optimalnoy glubiny zakladki gorizontalnogo teploobmennika teplovogo nasosa [Determining the optimal placement depth for a horizontal heat exchanger of a heat pump]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2015, no. 17–18 (181–182), pp. 48–53.
12. Piljae I., Xiaobing L., Henderson H. Operational Performance Characterization of a Heat Pump System Utilizing Recycled Water as Heat Sink and Heat Source in a Cool and Dry Climate. *Energies*, 2018, no. 11, 15 p. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/211>.
13. Amoabeng K.O., Lee K.H. A study on the performance characteristics of a testing facility for a water – to – water heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 2018, vol. 86, pp. 113–126. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717304565> (accessed 22 November 2018).
14. Chang K., Baik Y., Kang B., Yoon H. Simulation and preliminary experimental study on the sea water source tandem heat pumps. *2012 Oceans – Yeosu*. Yeosu, South Korea, 21–24 May 2012. 10 p. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6263559> (accessed 22 November 2018).
15. Kawalecki T.A., Cybulski A. Experimental and Numerical Investigations of Natural convection in freezing water. *Center of mechanics*, 2015, 10 p. Available at: <http://fluid.ippt.pan.pl/papers/kielce96.pdf> (accessed 22 November 2018).
16. Maksimov V.I., Salum A. Convection influence on ice formation process on the evaporator heat pump pipes. *MATEC Web of Conferences: the Fifth International Youth Forum. Smart Grids 2017*. Tomsk, Russia, 22–23 April, 2017. Vol. 141, 5 p. Available at: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/55/mateconf\\_smartgrids2017\\_01001.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/55/mateconf_smartgrids2017_01001.pdf) (accessed 22 November 2018).
17. Pophillat W., Attard G., Bayer P., Hecht-Méndez J., Blum P. Analytical solutions for predicting thermal plumes of groundwater heat pump systems. *Renewable Energy*, 2018. 12 p. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118309455> (accessed 22 November 2018).
18. Zhou C., Ni L., Ke Y., Yao Y. Experimental study on the thermal performance of multi-row helically coiled tube heat exchanger for surface water-source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 149, pp. 1274–1286. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118343412> (accessed 22 November 2018).
19. Zou S., Xie X. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 112, pp. 200–207. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111632378X> (accessed 22 November 2018).
20. Zhou C., Ni L., Yao Y., Zhou C. Heat transfer analysis of multi-row helically coiled tube heat exchangers for surface water-source heat pump. *Energy*, 2018, vol. 163, pp. 1032–1049. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218317262> (accessed 22 November 2018).

Received: 30 January 2019.

#### Information about the authors

**Vyacheslav I. Maksimov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Amer Saloum**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 339.13:669.27

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

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

Боярко Григорий Юрьевич<sup>2</sup>,  
gub@tpu.ru

<sup>1</sup> ПАО «Газпром»,  
Россия, 196143, г. Санкт-Петербург, пл. Победы, 2.

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

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью изучения проблем вольфрамовой промышленности России.

**Цель:** изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) вольфрамовых продуктов (вольфрамовых концентратов, паравольфрамата аммония, вольфрамового ангидрида, ферровольфрама и металлического вольфрама); выработка рекомендаций по оптимизации товарооборота вольфрамовых продуктов.

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

**Результаты.** Россия обладает достаточной сырьевой базой для обеспечения вольфрамовой продукцией национальных потребителей и поставок на экспорт. Возможно возобновление добычных работ на Тырнаузском ГОКе в Кабардино-Балкарской Республике, Джидинском вольфрамо-молибденовом комбинате в Республике Бурятия и осуществление нового добывающего проекта на Агылкинском месторождении в Республике Саха (Якутия). Российский рынок вольфрамового сырья подвержен резким колебаниям объемов производства, экспорта и импорта, осложняемым несогласованностью интересов добывающих, перерабатывающих и потребляющих вольфрамовую продукцию предприятий. Кроме сокращения добычи вольфрамового сырья вследствие остановки выработанных рудников возникли встречные импортно-экспортные потоки вольфрамовых концентратов и ферровольфрама, создавая искусственную импортозависимость для их потребителей. Для «оздоровления» российской вольфрамовой промышленности необходима консолидация предприятий, добывающих вольфрамовое сырье, и перерабатывающих предприятий в вертикально интегрированные холдинги с привлечением состоятельных инвесторов, реанимация закрытых добывающих производств на крупных и уникальных месторождениях с бедными рудами на основе улучшения технологий обогащения, поиски и освоение новых месторождений с богатыми вольфрамовыми рудами.

### Ключевые слова:

Вольфрамовая промышленность России, вольфрамовые концентраты, паравольфрамаат аммония, вольфрамовый ангидрид, ферровольфрам, вольфрам металлический, искусственная импортозависимость.

### Введение

Вольфрам – металл, используемый в твердых и жаропрочных материалах в качестве легирующей добавки в производстве сталей, кислотоупорных и специальных сплавов, в электротехнике, в химической промышленности [1]. Исходным сырьем для производства вольфрама являются вольфрамитовые и шеелитовые концентраты, производящиеся на собственно вольфрамовых, а также комплексных (молибден-вольфрамовых, вольфрам-оловянных и др.) месторождениях [2–4]. Товарными вольфрамовыми продуктами являются сырьевые *вольфрамовые руды и концентраты*, промежуточные продукты: *паравольфрамаат аммония, вольфрамовый ангидрид и ферровольфрам*, и конечные продукты: *металлический вольфрам и карбид вольфрама*.

Особенностями рынка вольфрамовых продуктов является давление естественной монополии Китая, производящего до 80 % мирового предложения вольфрамовых продуктов, и неустойчивость предложения вольфрамового сырья остальными добывающими производителями при нестабильности цен на вольфрамовые продукты [1, 5–13]. Сложное положение сложилось и в российской вольфрамовой промышленности. Если

СССР в период плановой экономики являлся импортером вольфрамового концентрата и экспортером вольфрамовых продуктов, то в настоящее время российская вольфрамовая промышленность, добывая вольфрамовый концентрат в десять раз меньше Китая, стала мировым лидером его экспорта. В то же время российские потребители вольфрамового сырья периодически импортируют вольфрамовый концентрат, а также товарные вольфрамовые продукты. Сложившаяся ситуация отсутствия эффективной кооперации производителей и потребителей вольфрамового сырья и их товарных продуктов на российском рынке требует своего решения.

### Методы исследований

С целью изучения российского рынка вольфрамовых продуктов были обработаны данные по движению товарных потоков вольфрамовых продуктов за 1996–2017 гг., по динамике мировых цен на вольфрамовые продукты и цен российского импорта и экспорта. Источники информации: бюллетени и обзоры Геологической службы США и Британии [14, 15], Государственные доклады Федерального агентства недропользования России [16], статистические данные Таможенных служб России [17] и



Казахстана [18], обзоры маркетинговых компаний [19, 20]. Недостаточно полна информация по производству и экспорту ферротитана, поэтому его национальное потребление можно оценивать лишь приблизительно. Практически полностью отсутствует информация по объемам выпуска российскими предприятиями карбида вольфрама, поэтому этот продукт в анализе не участвует. Цены на вольфрамовый концентрат приведены к стоимости 1 метрической тонны  $WO_3$ . Диаграммы показателей построены в интервалах времени, по которым собраны наиболее достоверные данные с минимальной погрешностью баланса. В качестве индикатора мировых цен международной торговли выбраны импортные цены для самого емкого рынка вольфрамовых продуктов – США. Уровень импортозависимости оценивался как доля импортных поставок в объемах потребления российских перерабатывающих предприятий, уровень экспортоориентированности – как доля экспортных поставок от объемов добычи российских предприятий.

#### Состояние вольфрамодобывающей промышленности России

Ситуация по обеспечению промышленности России вольфрамовым сырьем является противо-

речивой. На территории России имеются действующие предприятия по добыче и переработке вольфрамового сырья, а также производство вольфрамовых продуктов, но их внутренний рынок сбыта весьма ограничен, а на мировом рынке торговая политика вольфрамсодержащими материалами определяется монопольным давлением китайских производителей, осуществляющих до 65–70 % мирового производства вольфрама [1].

Добычу вольфрамовых руд и концентратов осуществляют (рис. 1):

- ОАО «Приморский ГОК» (ОАО «ГК «АИР» на месторождении Восток-2 (среднее содержание  $WO_3 > 1\%$ ), Приморский край;
- ООО «Лермонтовский ГОК» на Лермонтовском месторождении ( $WO_3 > 1\%$ ), Приморский край;
- ЗАО «Новоорловский ГОК» на Спокойнинском месторождении ( $WO_3 = 0,224\%$ ), Забайкальский край;
- ООО «Старательская артель «Кварц»» на Бом-Грохонском месторождении ( $WO_3 = 0,9\%$ ), Забайкальский край.

Попутную добычу вольфрамового концентрата осуществляет ООО «Правоурмийское» на одноименном оловянном месторождении (Хабаровский край) и ЗАО «Закаменск» (дочернее предприятие



Рис. 1. Вольфрамоносные провинции и предприятия, добывающие, перерабатывающие и производящие вольфрамовую продукцию: 1 – вольфрамоносные провинции (I – Северо-Кавказская, II – Южно-Средне-Уральская, III – Алтай-Саянская, IV – Селенгино-Становая, V – Монголо-Забайкальская, VI – Ханкайско-Охотская, VII – Яно-Колымская, VIII – Чукотская); 2 – месторождения вольфрама; 3 – предприятия, добывающие вольфрамовое сырье (а – действующие, б – законсервированные); 4 – гидрометаллургические предприятия, перерабатывающие вольфрамовое сырье, с производством паравольфрамата аммония и вольфрамового ангидрита; 5 – предприятия с производством вольфрама металлического и карбида вольфрама; 6 – ферросплавные заводы, производящие ферровольфрам

Fig. 1. Tungsten bearing provinces and enterprises producing, processing and manufacturing tungsten products; 1 – tungsten bearing provinces (I – Severo-Kavkazskaya, II – Yuuzhno-Sredne-Uralskaya, III – Altae-Sayanskaya, IV – Selengino-Stanovaya, V – Mongolo-Zabaykalskaya, VI – Khankaysko-Okhotskaya, VII – Yano-Kolymskaya, VIII – Chukotskaya); 2 – tungsten deposits; 3 – enterprises producing tungsten raw materials (a – active, b – canned); 4 – hydrometallurgical enterprises processing tungsten raw materials, with the production of ammonium paratungstate and tungsten anhydrite; 5 – enterprises with the production of tungsten metal and tungsten carbide; 6 – ferroalloy plants producing ferrotungsten

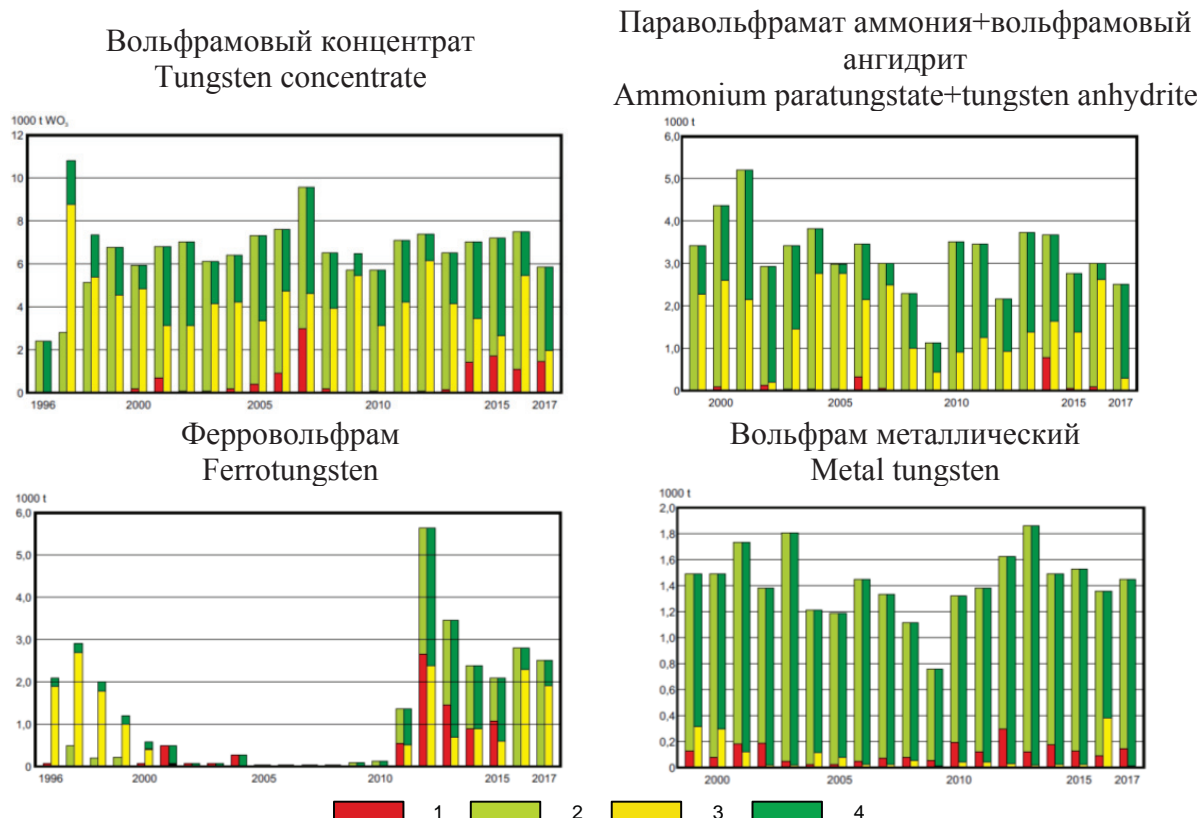


Рис. 2. Динамика баланса рынков вольфрамовых продуктов России за 1996–2017 гг. Составлено по обобщенным данным [14–20]. 1 – импорт, 2 – производство, 3 – экспорт, 4 – нетто-потребление

Fig. 2. Dynamics of balance of Russian tungsten products markets for 1996–2017. Compiled from generalized data [14–20]. 1 – import, 2 – production, 3 – export, 4 – net consumption

ООО «Группа Акрополь») из отвалов закрытого в 90-е гг. Джидинского ГОКа на Бурун-Нарынском месторождении (Республика Бурятия).

В 90-е гг. была остановлена добыча вольфрамового сырья на Иультинском ГОКе в Чукотском АО и Тырнаузском вольфрамо-молибденовом комбинате в Республике Кабардино-Балкария.

На рис. 2 приведен баланс внутреннего рынка вольфрамового концентрата РФ в 1996–2017 гг.

Добыча вольфрамовых руд относительно стабильна и находится на уровне 5,5–7,0 тыс. т/год. Значительная часть (45–90 %) произведенного вольфрамовых концентратов идет на экспорт. В условиях, когда мировая добыча вольфрама увеличивается с темпами +7,6 %/год, доля предложения вольфрамовых концентратов из России падает с 12,1 % в 2000 г. до 2,6 % в 2017 г. Рост добычи вольфрама в Китае (+8,8 %/год и 83 % мировой добычи вольфрамового концентрата в 2017 г.) и Вьетнаме (+35,4 %/год и 7,5 % в 2017 г.), а также появление новых участников добычи вольфрама (в Британии, Испании, Австралии, Руанде, Бурунди, Зимбабве) осложняет позиции России на рынке предложения вольфрамового сырья.

Нетто-потребление вольфрамовых руд колеблется от 1 до 5 тыс. т/год. Среднегодовое изменение потребления вольфрамового концентрата ра-

стет – +9,1 %, как и реализации (потребление+экспорт) – +4,3 %/год.

Для обеспечения работы российские потребители вынуждены периодически (2006–2007 и 2014–2017 гг.) приобретать по импорту крупные партии вольфрамового сырья – до 3 тыс. т/год на сумму до 68 млн \$США/год.

Вольфрамовое сырье поступает из Южной Кореи, Японии, Нидерландов, Канады, Вьетнама, и других стран (рис. 3). Экспортируется же оно в Китай, Южную Корею, Австрию, Японию и Нидерланды, образуя, в том числе, встречные импортно-экспортные потоки.

Динамика цен мировой торговли на вольфрамовые руды и концентраты (рис. 4) имеет следующие временные тренды: стабильный уровень 2600–3800 \$США/т в период 1996–2004 гг., подъем цен в 2005–2006 гг. и стабилизация на уровне 12400–13400 \$США/т в 2006–2010 гг., новый подъем с историческим максимумом в 23 300 \$США/т в 2012 г. и плавное падение до 17 900 \$США/т в 2015 г. (в 2017 г. – 18 900 \$США/т). Цены российского импорта и экспорта на 20–40 % ниже мировых, причем если изменения экспортных цен конформны мировым, то импортные цены имеют дополнительно дисгармонию резких скачков.

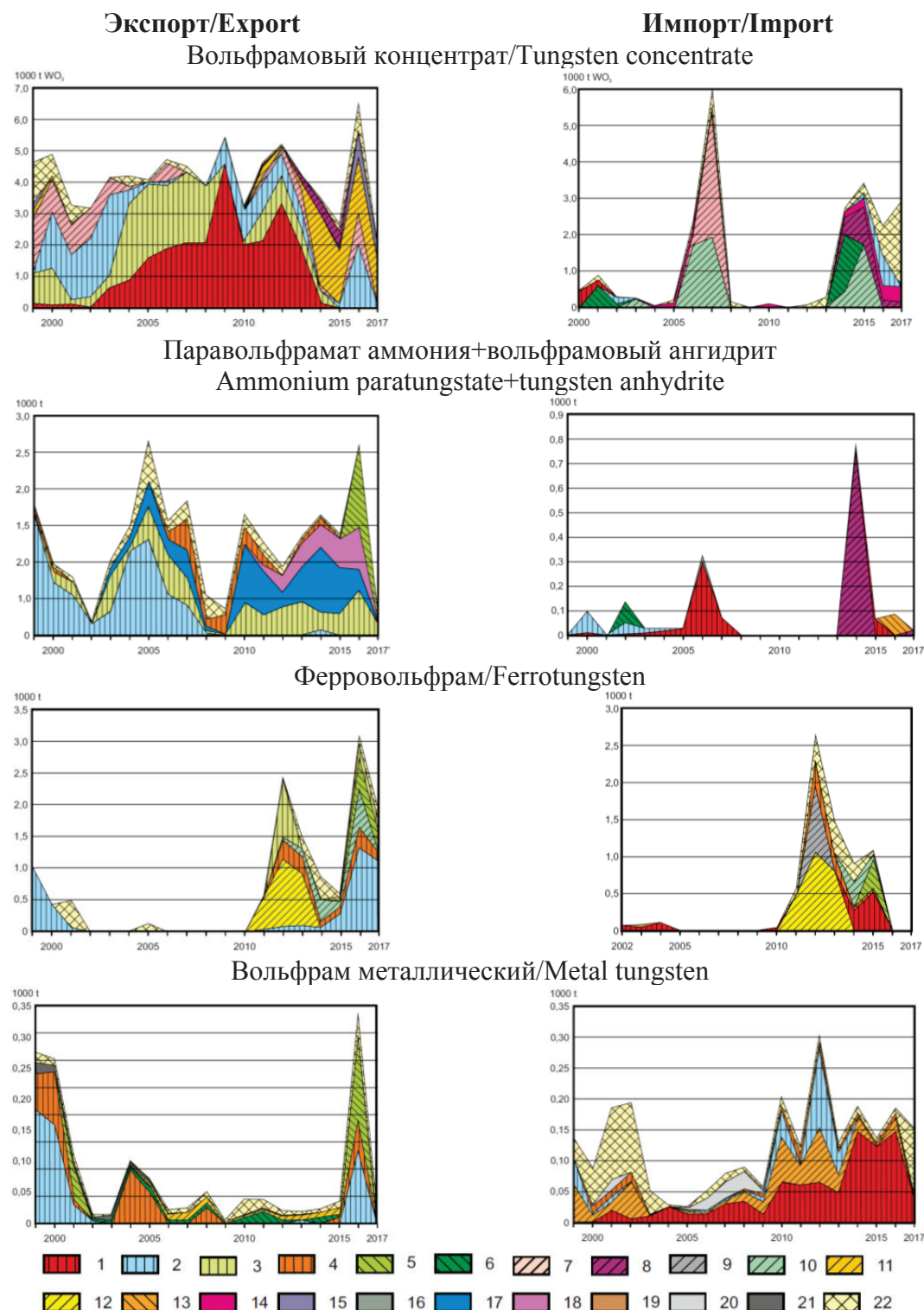


Рис. 3. Динамика объемов импорта и экспорта вольфрамовых продуктов по странам-партнерам за 1999–2017 гг. Составлено по обобщенным данным [14–20]. 1 – Китай, 2 – Нидерланды, 3 – Австрия, 4 – Германия, 5 – Эстония, 6 – США, 7 – Япония, 8 – Вьетнам, 9 – Латвия, 10 – Канада, 11 – Южная Корея, 12 – Казахстан, 13 – Узбекистан, 14 – Монголия, 15 – Сингапур, 16 – Британия, 17 – Чехия, 18 – Франция, 19 – Бразилия, 20 – Финляндия, 21 – Украина, 22 – другие страны

Fig. 3. Dynamics of import and export volumes of tungsten products by partner countries for 1999–2017. Compiled from generalized data [14–20]. 1 – China, 2 – Netherlands, 3 – Austria, 4 – Germany, 5 – Estonia, 6 – US, 7 – Japan, 8 – Vietnam, 9 – Latvia, 10 – Canada, 11 – Republic of Korea, 12 – Kazakhstan, 13 – Uzbekistan, 14 – Mongolia, 15 – Singapore, 16 – UK, 17 – Czech Republic, 18 – France, 19 – Brazil, 20 – Finland, 21 – Ukraine, 22 – other countries

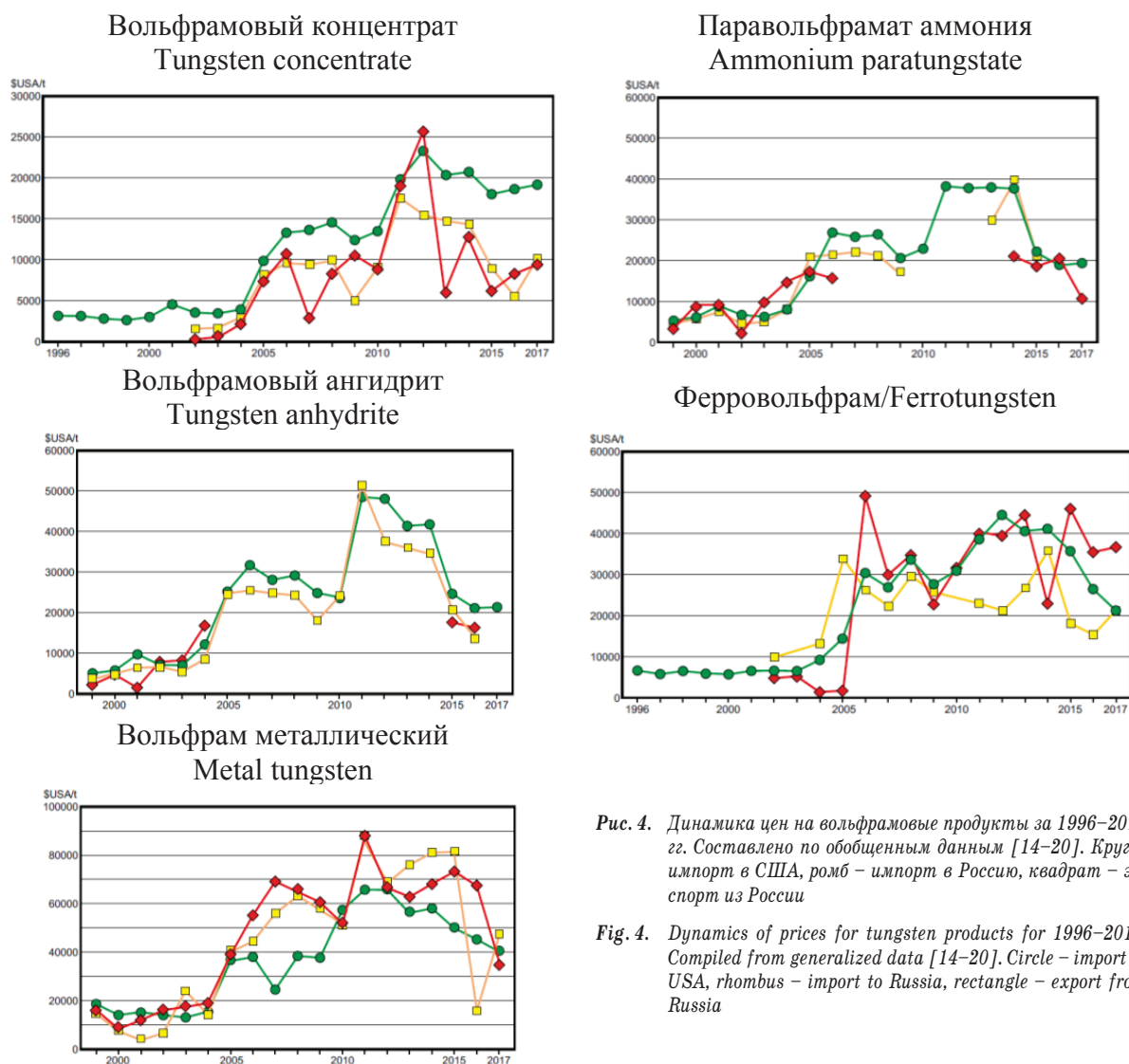


Рис. 4. Динамика цен на вольфрамовые продукты за 1996–2017 гг. Составлено по обобщенным данным [14–20]. Круг – импорт в США, ромб – импорт в Россию, квадрат – экспорт из России

Fig. 4. Dynamics of prices for tungsten products for 1996–2017. Compiled from generalized data [14–20]. Circle – import to USA, rhombus – import to Russia, rectangle – export from Russia

В период 1997–2017 гг. доля экспорта вольфрамовых концентратов от национальной добычи превышает 60 %, т. е. этот товарный продукт является *экспортноориентированным* (рис. 5). Одной из причин значительного экспорта вольфрамового концентрата являлось расположение добывающих предприятий на Дальнем Востоке, а потребляющих его – в европейской части России, когда ставки железнодорожного тарифа для руд цветных металлов являются самыми высокими среди всех перевозимых товарных групп. В результате этого становится выгодно экспортировать вольфрамовый концентрат, даже с учетом расходов на вывозную таможенную пошлину (10 % от стоимости). В то же время в 2006–2007 и 2014–2017 гг. доля импорта вольфрамовых концентратов превышает 25 % от производства (в 2016 г. – свыше 100 %). По сути дела, возникает искусственная импортозависимость потребителей вольфрамовых концентратов ввиду недостатка поставок с национальных добывающих предприятий, отправляющих большую часть своей продукции на экспорт.

#### Состояние промышленности по переработке вольфрамового сырья в России

Паравольфрамат аммония или «желтый ангидрит вольфрама» ( $\text{NH}_4[\text{WO}_2\text{F}_3]$ ) и вольфрамовый «синий» ангидрит ( $\text{WO}_3$ ) являются исходным сырьем для производства ферровольфрама и металлического вольфрама, а также других соединений вольфрама.

Производство паравольфрамата аммония (ПВА) и вольфрамового ангидрита (ВА) осуществляют следующие предприятия (рис. 1):

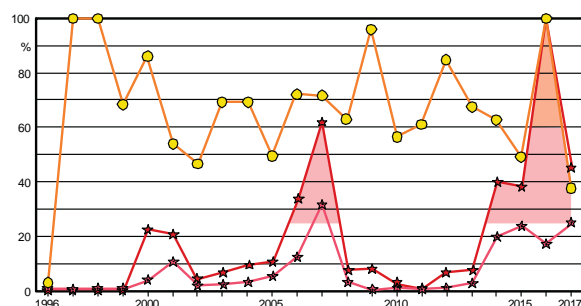
- ОАО «Гидрометаллург», г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика;
- ОАО «Кировградский завод твердых сплавов», г. Кировоград, Свердловская область.

Динамика рынка суммы ПВА+ВА показана на рис. 2. Наблюдается очевидная экспортная направленность производимых этих промежуточных вольфрамовых продуктов.

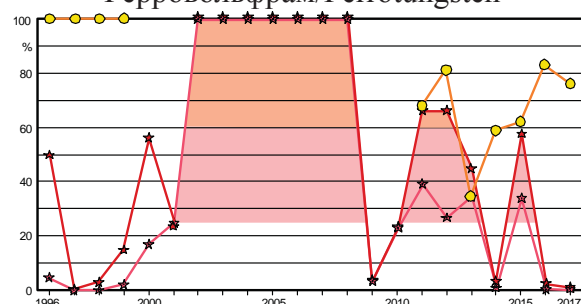
Производство суммы ПВА+ВА во времени крайне неравномерно – повышение до 5,2 тыс. т в 2001 г. и падение до 1,1 тыс. т в 2009 г.



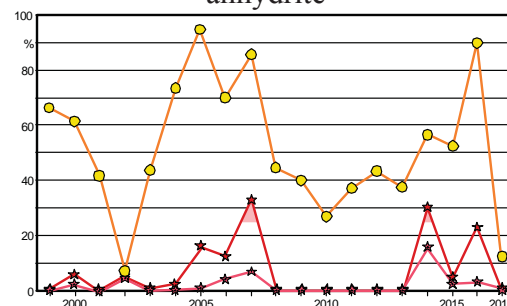
### Вольфрамовый концентрат Tungsten concentrate



### Ферровольфрам/Ferrotungsten



### Паравольфрамат аммония+вольфрамовый ангидрит Ammonium paratungstate+tungsten anhydrite



### Вольфрам металлический/Metal tungsten

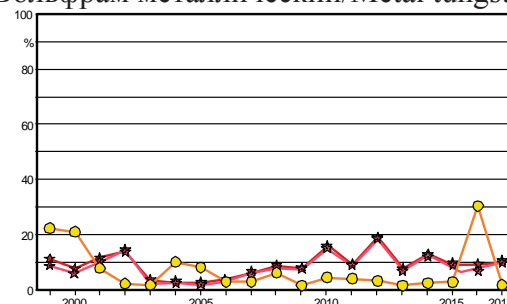


Рис. 5. Динамика долей импорта и экспорта вольфрамовых продуктов в России за 1996–2017 гг. ★ – доля импорта от потребления, ★ – доля импорта от реализации (потребления+экспорта), ● – доля экспорта от производства. Розовое поле – умеренная импортозависимость (25–60 %), коричневое – сильная импортозависимость (>60 %)

Fig. 5. Dynamics of shares of import and export of tungsten products in Russia for 1996–2017. ★ – share of imports from consumption, ★ – share of imports from sales (consumption+exports), ● – export share from production. Pink field is the moderate import dependence (25–60 %), brown field is the strong import dependence (>60 %)

Импорт ПВА+ВА незначителен (максимум 0,55 тыс. т на сумму 23,1 млн \$США в 2014 г.) и эпизодичен. Поставки промпродуктов осуществляются из Китая, а в отдельные годы – из Вьетнама, Узбекистана, Нидерландов, США, Англии (рис. 3).

На мировом рынке имеет место увеличение продаж вольфраматов и вольфрамового ангидрита (10 тыс. т в 2017 г.) с темпами прироста +4,0 %/год. Значительная часть российского ПВА+ВА экспортируется, причем его объемы имеют значительные колебания во времени (от 0,2 до 2,7 тыс. т/год). Доля России в мировой торговле вольфраматами небольшая – 0,1–5,8 %. В качестве покупателей выступают Нидерланды, Австрия, Чехия, Германия, Франция, Эстония и др. (рис. 3).

Динамика мировых цен на паравольфрамат аммония и вольфрамовый ангидрит (рис. 4) имеет временные тренды, схожие с динамикой цен на вольфрамовый концентрат: низкий стабильный уровень в период 1999–2004 гг., подъем цен в 2005–2006 гг. и стабилизация цен в 2006–2008 гг., снижение цен в 2009 г., новый резкий подъем в 2011 г. со стабилизацией цен в

2011–2014 гг. и последнее падение цен к локальному минимуму в 2016 г. Цены импорта промпродуктов в России вольфрамового концентрата в принципе близки к мировым, но цены экспорта – на 20–30 % ниже мировых.

Исходя из динамики долей импорта и экспорта в 1999–2017 гг. паравольфрамат аммония и вольфрамовый ангидрит являются экспортоориентированными (рис. 5).

Динамика рынка ферровольфрама в России показана на рис. 2. Производство ферровольфрама крайне нестабильно и составляет первые сотни тонн в год. Российские предприятия по выпуску ферровольфрама (рис. 1):

- ПАО «Ключевской завод ферросплавов», г. Двуреченск, Свердловская область;
- ООО «Рязанский завод ферросплавов и лигатур», г. Рязань;
- ООО «Молирен», г. Рошаль, Московская область;
- ООО «Унечский завод тугоплавких металлов», г. Унеча, Брянская область;
- ООО «Предприятие «Кристалл», г. Кострома;
- ООО «Зубцовский машиностроительный завод», г. Зубцовск, Тверская область;

- ООО «Промцветмет», г. Челябинск;
- ООО «Вишневогорский металлургический завод «Северный ниобий», г. Екатеринбург.

Потребление же ферровольфрама российскими потребителями трудно оценить, но учитывая периодические импортные закупки до 1,1 тыс. т/год при одновременном экспорте до 2,7 до тыс. т/год он также составляет первые сотни тонн в год.

Поставки ферровольфрама по импорту осуществлялись из Казахстана, Эстонии, Германии, Китая, Латвии и др. (рис. 3). В 2014 г. в статистике Федеральной таможенной службы РФ [17] указывается значительная партия импорта ферровольфрама из Казахстана – 14,4 тыс. т на сумму 331 млн \$США, но этот транш не подтвержден в показателях экспорта в Таможенной службе Республики Казахстан [18]. Скорее всего, это результат переучета прежних поставок ферровольфрама и в проведенный баланс он не включен.

На экспорт же ферровольфрама поставляется значительно больше официального производства – 0,4–2,7 тыс. т/год, что свидетельствует о неполных данных Госкомстата по его производству. По годам экспортные поставки этого продукта крайне неравномерны. Страна-покупателями ферровольфрама являются: Нидерланды, Латвия, Германия, Канада, Словакия, Китай и Эстония (рис. 3), т. е. и здесь появляются встречные импортно-экспортные потоки продукции. Формальный профицит импорта-экспорта на рынке ферровольфрама РФ не снимает проблемы его встречных потоков.

Динамика мировых цен на ферровольфрам коррелирует с динамикой мировых цен на вольфрам-овые руды и концентраты и имеет следующие временные тренды (рис. 4): стабильный уровень 5500–6500 \$США/т в период 1996–2003 гг., подъем цен в 2004–2006 гг. и стабилизация на уровне 27 000–34 000 \$США/т в 2006–2010 гг., новый подъем с историческим максимумом в 45 000 \$США/т в 2012 г. и падение до 21 200 \$США/т в 2017 г. Цены импорта в Россию ферровольфрама нестабильны – могут быть и больше и меньше мировых, а экспортные цены преимущественно на 20–40 % ниже мировых.

Исходя из динамики долей импорта в 1996–2017 гг. ферровольфрам периодически попадает в область формальной импортозависимости (рис. 5), но в связи с неопределенностью объемов национального потребления эта категория для него весьма условна. По динамике долей экспорта ферровольфрама (большей частью его экспорт больше объемов национального производства), этот продукт также является экспортоориентированным товаром.

Максимальное внутреннее потребление вольфрам-овых продуктов в России приходится на *металлический вольфрам*, используемый для производства твердых сплавов.

Металлический вольфрам производят (рис. 1):

- ОАО «Победит», г. Владикавказ, Республика Северная Осетия;

- ОАО «Кировградский завод твердых сплавов», г. Кировоград, Свердловская область;
- ООО «Унечский завод тугоплавких металлов», г. Унеча, Брянская область;
- ОАО «Полема», г. Тула.

Всего ежегодно производится до 1,7 тыс. т металлического вольфрама, а также импортируется до 200 т/год (рис. 2). На мировом рынке имеет место увеличение продаж металлического вольфрама (24 тыс. т в 2017 г.) с темпами прироста +5,6 %/год. Национальное потребление вольфрам-овых твердых сплавов неравномерно во времени и составляет 1,0–1,7 тыс. т/год. Имеется небольшой рост потребления за период 1999–2017 гг. – +2,5 %/год.

Импорт вольфрама металлического крайне мал и неравномерен во времени. Поставки осуществляются из Китая, Узбекистана, Германии, Нидерландов, Финляндии и др. (рис. 3).

На экспорт обычно поставляется всего до 0,05 тыс. т/год вольфрама металлического, лишь изредка происходит повышение до 0,3–0,4 тыс. т/год. Поставки осуществляются в Нидерланды, Германию, Украину, Эстонию, США и др. (рис. 3).

Динамика мировых цен на вольфрам металлический схожа с динамикой мировых цен на вольфрам-овые руды, промпродукты и ферровольфрам и включает следующие временные тренды (рис. 4): стабильный уровень 12 500–18 000 \$США/т в период 1996–2004 гг., подъем цен в 2005–2006 гг. и стабилизация на уровне 35 000–37 000 \$США/т в 2006–2009 гг., новый подъем до 65 500 \$США/т в 2011–2012 гг. и последующее падение до 40 600 \$США/т к 2017 г. Цены импорта и экспорта в Россию вольфрама металлического крайне нестабильны, в отдельных случаях на 40–60 % выше мировых, а в 2016 г. – по чрезвычайно низким ценам, в 3 раза ниже мировых. Скорее всего, в учет таможенной статистики вольфрама необработанного попадают изделия из вольфрама и вольфрам-овые отходы, что вызывает искажение сравниваемых цен.

Исходя из динамики долей импорта в 1996–2017 гг. имеющий существенно национальное потребление вольфрам металлический является импортонезависимым продуктом (рис. 5). Доля экспорта вольфрама металлического также мала.

На рис. 6 приведена динамика условной суммы товарооборота вольфрам-овых продуктов в пересчете на 100 % W в России за 1996–2017 гг., показывающая их экспортоориентированность (40–70 % от производства) и наличие критичного встречного импортного потока (до 40 %). Суммарно в товарообороте участвует 7–13 тыс. тW/год, с экспортным потоком 3,0–7,6 тыс. тW/год и импортным потоком 0,8–2,5 тыс. тW/год.

По состоянию на 2017 г. на импорт приходится 46 % от потребления вольфрам-овых концентратов (1,47 тыс. т на сумму 13,8 млн \$США), 1 % суммы паравольфрамата аммония + вольфрам-ового ангидрида (0,02 тыс. т на сумму 0,5 млн \$США), 0,3 %

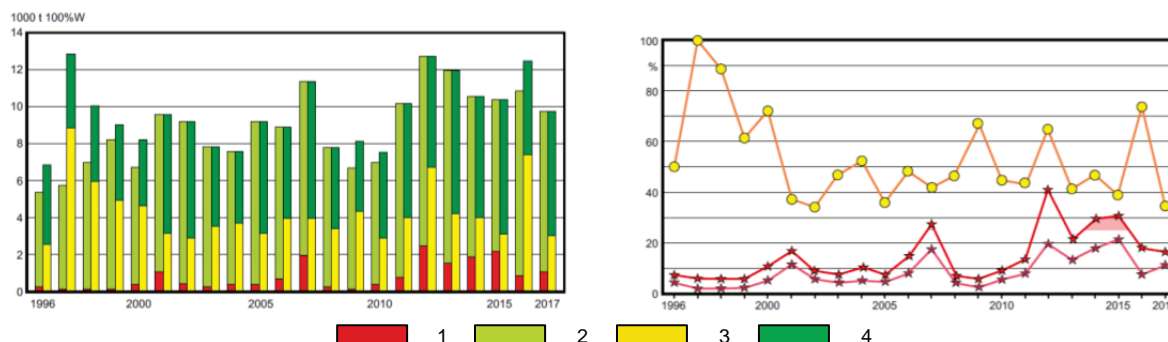


Рис. 6. Динамика рынка суммы товарооборота вольфрамовых продуктов в пересчете на вольфрам в России за 1996–2017 гг.: а) баланс рынка: 1 – импорт, 2 – производство, 3 – экспорт, 4 – нетто-потребление; б) динамика долей импорта и экспорта: ★ – доля импорта от потребления, ★ – доля импорта от реализации (потребления + экспорта), ● – доля экспорта от производства; розовое поле – умеренная импортозависимость (свыше 25–60 %)

Fig. 6. Market dynamics of the total commodity circulation of tungsten products in terms of tungsten in Russia for 1996–2017: a) market balance: 1 – import, 2 – production, 3 – export, 4 – net consumption; b) dynamics of import and export shares: ★ – share of imports from consumption, ★ – share of imports from sales (consumption + exports), ● – share of export from production; pink field is the moderate import dependence (over 25 %)

ферровольфрама (0,01 тыс. т на сумму 0,1 млн \$США) и 3 % вольфрама металлического (0,03 тыс. т на сумму 1,2 млн \$США). В целом по состоянию на 2017 г. суммарно вольфрамовые продукты в России являются потенциально импортозависимыми (24,2 % от потребления суммы вольфрамовых продуктов) [21, 22] и одновременно экспортноориентированными (исключая вольфрам металлический).

Для всех вольфрамовых продуктов наблюдаются встречные импортно-экспортные потоки (через Нидерланды, Германию Эстонию, Латвию, Англию), что свидетельствует о значительной доле торговли ими через трейдерские компании (Nordmet SA, C. Steinweg Handelsveem B.V., Scholz Recycling AG & Co. KG и др. [11]). Наличие встречных потоков указывает на противоречие интересов добывающих, перерабатывающих и потребляющих вольфрамовую продукцию предприятий [23]. К тому же независимые трейдерские компании идут по наиболее легкому пути снижения цены на российские вольфрамовые продукты. Потоки российского экспорта и импорта для всех вольфрамовых продуктов характеризуются резкими скачками изменений, и по объемам, и по переменам торговых партнеров (рис. 3).

#### Развитие вольфрамовой промышленности России

Прогноз рынка потребления вольфрамовой продукции российскими предприятиями осложняется внутренними и внешними факторами. Внутреннее потребление вольфрамовых концентратов (2,0–4,0 тыс. т/год) значительно меньше текущих объемов их национальной добычи (5,5–7,0 тыс. т/год), которые к тому же могут быть увеличены до 10 тыс. т/год. Производство ферровольфрама (до 2,5 тыс. т/год) было возобновлено в 2011 г., в условиях резкого роста мировых цен на этот продукт, но сконцентрировано оно преимущественно на переработке вторичного сырья, объем предло-

жения которого ограничен. Использование ферровольфрама для производства жаропрочных и конструкционных сталей в России ограничено и колеблется в пределах 0,5–1,3 тыс. т/год. Основной объем национального потребления конечной вольфрамовой продукции приходится на металлический вольфрам и карбид вольфрама, используемые для изготовления быстрорежущего инструмента и буровых коронок, на уровне 1,0–1,5 тыс. т/год. Тенденции увеличения станочного парка и объемов разведочного бурения в России пока не проглядывается, и, скорее всего, объемы потребления карбида вольфрама останутся на том же уровне. На экспортное направление российских вольфрамовых продуктов оказывает давление сложившаяся ситуация избыточного предложения конкурентных производителей Китая, Германии и США. Это отчетливо видно в переменчивости состава российских контрагентов – покупателей вольфрамовой продукции. Экспорт 3,0–5,0 тыс. т/год вольфрамовых концентратов, 1,0–2,5 тыс. т/год паравольфрамата аммония и вольфрамового ангидрида, до 2,5 тыс. т/год ферровольфрама и до 0,4 тыс. т/год металлического вольфрама нестабилен и во времени и по странам-покупателям. Их стабилизацию можно упорядочить, создав собственные российские трейдерские компании, ориентированные на поиск надежных и стабильных потребителей вольфрамовых продуктов. Импортные же потоки вольфрамового сырья (до 3,0 тыс. т/год вольфрамовых концентратов и до 2,5 тыс. т/год ферровольфрама) являются нерациональными и в случае оздоровления российской вольфрамовой промышленности будут минимизированы.

В начале XXI в. в мире сложилась благоприятная обстановка для развития вольфрамовой промышленности. Бурный рост товарного производства (в первую очередь в Китае) способствовал резкому росту потребления вольфрамовых продуктов, а повышение цен на них – инвестиционной привлека-

тельности вложений в проекты вольфрамовых производств. Реанимированы давно остановленные добывающие производства в Канаде (рудник Кантанг), Вьетнаме (рудник Нуи-Пхао) и Британии (проекты Ваймет, Мирекс и Хемердон) с созданием или реконструкцией на них перерабатывающих производств [12, 14]. Впрочем, в последующей рецессии экономического кризиса 2009–2012 гг. канадское производство также легко было свернуто. Однако благоприятный инвестиционный период 2003–2008 гг. и благоприятное увеличение рынка потребления вольфрамовых продуктов в Германии (переход ее из экспортёров в нетто-импортеры этих товаров) в 2010–2017 гг. на состоянии российской вольфрамовой промышленности не отразились.

В целом же ситуация с российской вольфрамовой промышленностью продолжает оставаться неопределенной из-за отсутствия эффективной кооперации добывающих, перерабатывающих и потребляющих вольфрам производств, имеющих разнонаправленные интересы, а также внешнего воздействия, в зависимости от состояния мирового рынка вольфрамовой продукции.

Сходная ситуация нестабильности российской вольфрамовой промышленности имеет место также в других отраслях добывающей промышленности – кризисной оловянной (свертывание национальной добычи, тотальный экспорт оловянного концентрата и импорт металлического олова) и предкризисной борной (всего одно добывающее и перерабатывающее предприятие, встречные экспортные и импортные поставки буры и борной кислоты).

Следующие мероприятия могут улучшить ситуацию российского вольфрамового рынка:

1. *Консолидацией предприятий, добывающих вольфрамовое сырье, и перерабатывающих его предприятий в вертикально интегрированные холдинги.* В качестве примера можно привести успешную интеграцию такой же проблемной российской молибденовой промышленности АО «УК «Союзметаллресурс», объединившей действующие компании, добывающие молибден, и новые ферромолибденовые производства [16]. Процесс объединения производств, добывающих и перерабатывающих вольфрамовое сырье, в интегрированные структуры уже ведется. ЗАО «Компания «Вольфрам» включает перерабатывающие вольфрамовое сырье мощности ОАО «Гидрометаллург», ООО «Унечский завод тугоплавких металлов», ОАО «Победит» и подготавливаемые добывающие мощности ООО «Приморвольфрам». Этому холдингу требуется организовать интеграцию или кооперацию добывающих и перерабатывающих производств, а также создание собственных трейдерских компаний для управления торговлей вольфрамовыми продуктами как в России, так и за рубежом. Без формирования устойчивых товарных потоков постоянным потребителям товарных вольфрамовых продуктов их производство с позиции инвесторов будет оставаться высокорисковым. Та-

ким же эффективным решением будет привлечение в вольфрамовую отрасль эффективных инвесторов. В качестве возможного решения возрождения Тырнаузского ГОКа является ресурсный проект ООО «РТ – Развитие бизнеса» Госкорпорации «Ростех» с объемом инвестиций 22,8 млрд р. [24].

2. *Вовлечение в эксплуатацию новых вольфрамовых месторождений.* В настоящее время имеет смысл в первую очередь осваивать новые месторождения вольфрамовых руд со средним содержанием свыше 1 %  $WO_3$ . К таким объектам можно отнести Агылкитское шеелитовое месторождение в Республике Саха (Якутия), которое включает запасы в 91 тыс. т  $WO_3$  при среднем содержании 1,271 %  $WO_3$  [16]. Перспективы нахождения богатых вольфрамовых месторождений имеются на Гетканчикском рудном поле в Амурской области и на Иультинском рудном поле в Чукотском АО.

3. *Реанимация закрытых добывающих производств на месторождениях с бедными рудами на основе улучшения технологий обогащения.* На территории России находится одно из крупнейших в мире Тырнаузское молибден-вольфрамовое месторождение с рядовыми рудами (0,4 %  $WO_3$ ), в настоящее время законсервированное. Рядом с ним находится еще одно крупное Кти-Тырнаузское вольфрамовое месторождение со средним содержанием 0,345 %  $WO_3$ . Создание технологий обогащения, повышающих экономическую эффективность добычи вольфрамового сырья из бедных руд [25, 26], позволило бы возродить Тырнаузский ГОК (проект ООО «РТ – Развитие бизнеса» Госкорпорации «Ростех») с созданием крупных по объемам поставок вольфрамовых руд, сопоставимых с мировыми производителями в Китае и Вьетнаме [24]. Здесь возможно развитие усовершенствования процессов рудоподготовки (крупнотонусовое обогащение в тяжелых суспензиях), рентгенометрического обогащения, снижения потерь металла с тонкими классами, использования новых флотационных реагентов [27, 28]. Аналогично, на основе внедрения новых технологий обогащения вольфрамовых руд, возможен пересмотр ресурсной базы Приморского ГОКа на месторождении Восток-2, где бедные руды списаны с баланса, а в отработке находятся только супербогатые руды со средним содержанием 4,4 %  $WO_3$ .

Одной из новых особенностей мировой практики разработки вольфрамовых месторождений является ревизия старых месторождений, на которых вольфрам был лишь малоинтересным попутным компонентом или в результате селективной выработки остались только бедные руды. На этих объектах возобновляется производство вольфрамового сырья в Англии, Испании, Перу, Аргентине, Австралии [29, 30]. Возможна также ревизия (на предмет попутного вольфрама) известных оловянных месторождений в США, Мексике, Чили. Отмечается также наличие в технологических схемах многих новых проектов передела вольфрамовых концентратов в паравольфрамат аммония не-



посредственно на месте их обогащения [31, 32]. Подобная практика успешно применена в смежной российской молибденовой промышленности – путем создания ферромолибденовых производств на Сорском и Жерикенском молибденовых рудниках АО «УК «Союзметаллресурс»» [16].

Еще один проект реанимации Джидинского вольфрамомолибденового комбината на базе Инкурского и Холтосонского месторождений в Республике Бурятия, включенный в перечень инвестиционных проектов Байкальского региона, осуществляет ООО «Тверосплав» (г. Чита). Он включает создание новых производственных участков, современной обогатительной фабрики и гидрометаллургического цеха по производству товарных вольфрамовых продуктов [16, 19].

В части промышленных способов переработки вольфрамового сырья также требуется внедрение новых технологий [28]:

- сплавление с сульфатом натрия и углем с образованием вольфрамата натрия или сульфосолей вольфрама;
- восстановительная плавка хвостов вольфрамового производства с добавлением в шихту СаО и Fe с образованием металлического расплава;
- хлорирование вольфрамового сырья с образованием летучих хлоридов и оксихлоридов вольфрама, которые легко разлагаются водой с образованием вольфрамовой кислоты;
- разложение вольфрамитовых концентратов растворами соды в автоклавах при повышенных температуре и давлении;
- спекание вольфрамитов с известью с целью превращения вольфрамита в шеелит с последующей его кислотной переработкой в паравольфрамат аммония;
- электролитическое восстановление вольфрам-содержащих продуктов и концентратов с получением металлического вольфрама технического качества;
- щелочное доизвлечение вольфрама из кеков кислотного разложения шеелитовых концентратов.

4. *Государственные преференции для вольфрамовой промышленности.* Одной из причин кризиса российской вольфрамовой промышленности является пространственная отдаленность добывающих предприятий (на Дальнем Востоке) от перерабатывающих предприятий (в Европейской части России). Это приводит к дополнительным транспортным затратам при реализации вольфрамового сырья российским потребителям (увеличение себестоимости до 25 %) и становится более выгодно экспортировать полученную продукцию в Китай, Японию и Южную Корею (даже включая расходы на 10 % экспортную таможенную пошлину). Государство имеет возможность регулировать железнодорожные тарифы для дальних перевозок вольфрамового сырья от российского производителя его российским потребителям (в настоящее время с повышающим коэффициентом 2,516), вводя

понижающие тарифные коэффициенты, как, например, сделано для угля (0,4) и калия хлористого (0,139–0,1) [33]. В настоящее же время тарифные коэффициенты для руд цветных металлов самые высокие из всех перевозимых товарных продуктов.

Для проектов реанимации Тырнаузского ГОКа в Кабардино-Балкарской Республике и Джидинского ВМК в Республике Бурятия со стороны государства возможно стимулирование в виде временного обнуления ставки налога на добычу полезных ископаемых (для вольфрама – 8 % от его реализации), как это сделано для кризисных предприятий по добыче оловянного сырья на Дальнем Востоке [34].

Государственные органы в рамках своей компетенции осуществляют координацию действий исполнительной власти с участием заинтересованных хозяйствующих компаний и организаций в планировании мероприятий по импортозамещению. Так, ОАО «Победит» и ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» совместно с Государственной корпорацией «Ростех» участвуют в программе импортозамещения в станкоинструментальной промышленности в России [35], которая сопровождается различными мерами стимулирования и государственной поддержки реализации этих проектов.

#### Выводы

1. Российская вольфрамовая промышленность преимущественно ориентирована на экспорт по вольфрамовому концентрату (50–100 %), вольфраматам (40–90 %) и ферровольфраму (35–100 %). Является лидером мировой торговли вольфрамовых концентратов (12–31 % мирового рынка), но в то же время она утрачивает свои позиции на мировом рынке вольфрамовых продуктов. Лидеры мирового производства вольфрама (Китай и Вьетнам) наращивают добычу вольфрамового сырья, причем полностью перерабатывают его на вольфрамовые продукты с большей прибавочной стоимостью.
2. Россия обладает достаточной сырьевой базой для обеспечения вольфрамовой продукцией национальных потребителей и поставок на экспорт. Расширение объемов производства возможно за счет возобновления добычных работ на Тырнаузском ГОКе в Кабардино-Балкарской Республике (проект ООО «РТ – Развитие бизнеса» Госкорпорации «Ростех») и Джидинском ВМК в Республике Бурятия (проект ООО «Тверосплав»), а также осуществления нового добывающего проекта на Агылкитском месторождении в Республике Саха (Якутия).
3. Российский рынок вольфрама вследствие влияния внешних причин (цены и сбыт опосредованно вытекают из действий китайских производителей вольфрамовой продукции) разупорядочен и осложняется несогласованностью интересов добывающих, перерабатывающих и потре-

- бляющих вольфрамовую продукцию предприятий. В результате этого возникли встречные импортно-экспортные потоки вольфрамовых концентратов (импорт до 39 % от потребления), паравольфрамата аммония (до 30 %), ферровольфрама (до 66 %) и вольфрама металлического (до 30 %).
4. Для оздоровления российской вольфрамовой промышленности необходима консолидация добывающих вольфрамовое сырье и перерабатывающих предприятий в вертикально интегрированные холдинги, привлечение в вольфрамовую отрасль состоятельных инвесторов, реанимация закрытых добывающих производств на крупных и уникальных месторождениях с бедными рудами на основе улучшения технологий обогащения, поиски и освоение новых месторождений с богатыми вольфрамовыми рудами, создание производств с полным циклом переработки вольфрамового сырья с реализацией товарных вольфрамовых продуктов с высокой прибавочной стоимостью. Участие Госкорпорации «Ростех» в проектах реконструкции Тырнаузского ГОКа и предприятий производства твердых сплавов может исправить ситуацию нестабильности вольфрамовой отрасли.
5. Со стороны государства возможно содействие в «оздоровлении» российской вольфрамовой промышленности в части поддержки инфраструктурных проектов и стимулирования импортозамещения, а также регулирования железнодорожных тарифов на перевозку вольфрамового сырья от российского производителя его российским потребителям. Уменьшение железнодорожных тарифов на вольфрамовый концентрат (по аналогии с пониженными тарифами для угля и калийных солей) может решить проблему невыгодности поставок дальневосточного сырья на перерабатывающие предприятия в европейской части России и уменьшить вынужденный экспорт вольфрамового концентрата в азиатском направлении по ценам ниже мировых.
- #### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ
1. Александров П.В., Петров И.М., Гришаев С.И. Тенденции развития мирового и российского рынков вольфрама // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2012. – № 2. – С. 66–69.
  2. Локальное прогнозирование плутогенных месторождений молибдена, вольфрама и олова / Ф.П. Апелцин, С.Ф. Лугов, В.Т. Покалов, А.А. Фролов. – М.: Недра, 1985. – 244 с.
  3. Денисенко В.К. Месторождения вольфрама. – М.: Недра, 1978. – 143 с.
  4. Повилайтис М.М. Закономерности размещения и формирования месторождений вольфрама. – М.: Наука, 1975. – 255 с.
  5. Werner A.B.T., Sinclair W.D., Amey E.B. International strategic mineral issues summary report. Tungsten. U.S. Geological Survey. – November 2014. – 86 p. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/cir9300> (дата обращения: 12.11.2018).
  6. Zafirov B. The strategic challenges on world tungsten market // *International Journal on Information Technologies and Security*. – 2010. – № 3. – P. 69–80.
  7. World Tungsten Report. Metal-Pages Ltd. – November 2013. – 12 p. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tungsten/myb1-2013-tungs.pdf> (дата обращения: 12.11.2018).
  8. Anstett T.F., Bleiwas D.I., Hurdlebrink, R.J. Tungsten availability – market economy countries. A minerals availability program appraisal // *Information Circular*. – Pittsburgh: US Bureau of Mines, 1985. – 51 p.
  9. Brookes K.J.A. Tungsten targets munitions market // *Metal Powder Report*. – 1999. – V. 54. – № 10. – P. 16–19.
  10. Geology, geochemistry, and genesis of tungsten-tin deposits in the Baiganhu District, Northern Kunlun Belt, Northwestern China / Y. Gao, W. Li, Z. Li, J. Wang, K. Hattori, Z. Zhang, J. Geng // *Economic Geology*. – 2014. – V. 109. – № 6. – P. 1787–1799.
  11. Shedd K.B. Tungsten. [Advance Release]. 2015 Minerals Yearbook. – U.S. Geological Survey. – November 2014. – 22 p. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tungsten/myb1-2015-tungs.pdf> (дата обращения: 12.11.2018).
  12. Global tungsten demand and supply forecast / J. Dvořáček, R. Sousedíková, T. Vrátný, Z. Jureková // *Archives of Mining Sciences*. – 2017. – V. 62. – № 1. – P. 3–12. DOI: 10.1515/amsc-2017-0001.
  13. Focus on some aspects of market price trends for tungsten / J. Dvořáček, R. Sousedíková, A. Krzemien, A.S. Sanchez // *Acta Montanistica Slovaca*. – 2017. – V. 22. – № 2. – P. 126–135.
  14. U.S. Geological Survey. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs> (дата обращения 12.11.2018).
  15. Minerals UK. URL: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html> (дата обращения 12.11.2018).
  16. 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 12.11.2018).
  17. Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.ru/analytics/> (дата обращения: 12.11.2018).
  18. Kazdata. Маркетинговый бизнес-справочник Казахстана. URL: <https://kazdata.kz/> (дата обращения: 20.01.2018).
  19. Обзор рынка вольфрама в СНГ. 12 изд. – М.: ИГ «Инфомай», 2017. – 274 с.
  20. Международная торговля товарами. TrendEconomy. URL: <http://data.trendeconomy.ru/dataviewer/trade/statistics/> (дата обращения 12.11.2018).
  21. Хатьков В.Ю., Боярко Г.Ю. Регулирование импорта дефицитного для России минерального сырья // *Горный журнал*. – 2005. – № 9–10. – С. 53–56.
  22. Хатьков В.Ю. О товарных потоках импортозависимых минеральных продуктов // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2017. – № 5. – С. 66–71.
  23. Хатьков В.Ю., Боярко Г.Ю. Мировые и российские встречные импортно-экспортные потоки минерального сырья // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – № 3. – С. 145–167.
  24. Государственная корпорация «Ростех». Годовой отчет за 2017 год. Партнер в развитии. 10 лет устойчивого роста. – М.: Ростех, 2018. – 131 с. URL: <https://rostec.ru/upload/iblock/609/60954456d3f675625e60918653ceb028.pdf> (дата обращения 26.11.2018).
  25. Саматова Л.А., Шепета Е.Д., Алушкин И.В. Перспективы внедрения эффективных методов рудоподготовки в технологиях

- переработки бедных вольфрамовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S21. – С. 316–327.
26. Хантургаева Г.И. Комбинированные технологии комплексной переработки труднообогатимых молибденовых и вольфрамовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 14. – № 12. – С. 478–494.
27. Бутуханов В.Л., Хромцова Е.В. Изучение условий получения кондиционных вольфрамовых концентратов Лермонтовского месторождения // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2015. – № 2 (37). – С. 73–78.
28. Иванков С.И., Литвинцев Э.Г., Петкевич Д.Г. Проблемы создания современных экологически малонапряженных технологий переработки комплексных вольфрамовых руд и пути их решения // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. Обзорная информация. – М.: Изд-во ВНИИТИ, 2013. – Вып. 3. – С. 1–138.
29. Investment in new tungsten mining projects / S.A. Suarez, A. Krzemien, F.P. Riesgo, R.F.J. Iglesias, L.F. Sanchez, J.F.J. de Cos // Resources Policy. – 2015. – V. 46. – P. 177–190. DOI: 10.1016/j.resourpol.2015.10.003.
30. Beyond the pan-European standard for reporting of exploration results, mineral resources and reserves / A. Krzemien, F.P. Riesgo, S.A. Suarez, A.I. Diego // Resources Policy. – 2016. – V. 49. – P. 81–91. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.04.008.
31. Singh G.R.P. Modern hydrometallurgical production methods for tungsten // Journal of Metals. – 2006. – V. 58. – № 9. – P. 45–49.
32. Gaur R.P.S. Modern methods of hydrometallurgical production of ammonium paratungstate (APT) // Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference on Tungsten, Refractory and Hardmaterials 2011. – San Francisco, CA, United States, 18–21 May 2011. – P. 21–216.
33. Прейскурант N 10–01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами» // Постановление Федеральной энергетической комиссии РФ от 17.06.2003 № 47-т/5 (ред. от 05.09.2017). «Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти» (приложение к № 30, 28.07.2003).
34. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю. Мировой рынок олова и современное состояние оловянной промышленности России // Цветные металлы. – 2018. – № 1. – С. 47–55.
35. План мероприятий по импортозамещению в станкоинструментальной промышленности Российской Федерации. Утвержден Приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 31 марта 2015 г. N 650.

Поступила 22.12.2018 г.

#### Информация об авторах

**Хатьков В.Ю.**, начальник департамента 817 ПАО «Газпром»; соискатель нефтегазового отделения Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

UDC 339.13:669.27

## CURRENT STATE OF TUNGSTEN INDUSTRY IN RUSSIA

Vitaly Yu. Khatkov<sup>1,2</sup>,  
vitaliy@payler.com

Grigory Yu. Boyarko<sup>2</sup>,  
gub@tpu.ru

<sup>1</sup> Gazprom,  
2, Pobedy square, St. Petersburg, 196143, Russia.

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

**The relevance** of the work is caused by the need to study the problems of the Russian tungsten industry.

**The aim** of this research is to study the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of tungsten products (tungsten concentrates, ammonium paratungstate, tungsten anhydrite, ferrotungsten and metal tungsten); to develop recommendations for optimizing the turnover of tungsten products.

**Research methods:** statistical, graphic, logical.

**Results.** Russia has a sufficient raw material base to provide tungsten products to national consumers and exports. Resumption on Tyrnyauzsky mining and processing plant in the Kabardino-Balkar Republic, Jedin tungsten-molybdenum combine in the Republic of Buryatia and implementation of a new production project in Aglykynskoe mine in the Republic of Sakha (Yakutia) is possible. Russian tungsten raw materials market is subject to sharp fluctuations in production, export and import volumes, complicated by the lack of coordination of interests of mining, processing and consuming tungsten products enterprises. In addition to reducing the production of tungsten raw materials due to the stop of loss-making mines the counter import-export flows of tungsten concentrates, ammonium paratungstate and ferrotungsten appeared. These flows formed the dependence on imports for their consumers. To recover Russian tungsten industry, it is necessary to consolidate enterprises, extracting tungsten raw materials and processing enterprises into vertically integrated holdings with the involvement of wealthy investors, the resuscitation of closed mining operations in large and unique fields with poor ores on the basis of improving enrichment technologies, search and development of new fields with rich tungsten ores. On the part of the state, it is possible to assist in improvement of the Russian tungsten industry in terms of supporting infrastructure projects and stimulating import substitution, as well as regulating railway tariffs for tungsten raw material transportation from Russian manufacturer to its Russian consumers.

**Key words:**

Tungsten industry in Russia, tungsten concentrates, ammonium paratungstate, tungsten dioxide, ferrotungsten, metal tungsten, artificial dependence on imports.

**REFERENCES**

- Aleksandrov P.V., Petrov I.M., Grishaev S.I. Trends in development of the world and Russian tungsten markets. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2012, no. 2, pp. 66–69. In Rus.
- Apeltsin F.R., Lugov S.F., Pokalov V.T., Frolov A.A. *Lokalnoe prognozirovaniye plutonogennykh mestorozhdeniy molibdena, volframa i olova* [Local prediction of plutogenic deposits of molybdenum, tungsten and tin]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 244 p.
- Denisenko V.K. *Mestorozhdeniya volframa* [Tungsten deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 143 p.
- Povilaytis M.M. *Zakonomernosti razmeshcheniya i formirovaniya mestorozhdeniy volframa* [Patterns of placement and formation of tungsten deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 255 p.
- Werner A.B.T., Sinclair W.D., Amey E.B. *International strategic mineral issues summary report. Tungsten*. U.S. Geological Survey. November 2014. 86 p. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/cir9300> (accessed 12 November 2018).
- Zafirov B. The strategic challenges on world tungsten market. *International Journal on Information Technologies and Security*, 2010, no. 3, pp. 69–80.
- World Tungsten Report*. Metal-Pages Ltd. November 2013. 12 p. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tungsten/myb1-2013-tungs.pdf> (accessed 12 November 2018).
- Anstett T.F., Bleiwas D.I., Hurdelbrink, R.J. Tungsten availability – market economy countries. A minerals availability program appraisal. *Information Circular*. Pittsburgh, US Bureau of Mines, 1985. 51 p.
- Brookes K.J.A. Tungsten targets munitions market. *Metal Powder Report*, 1999, vol. 54, no. 10, pp. 16–19.
- Gao Y., Li W., Li Z., Wang J., Hattori K., Zhang Z., Geng J. Geology, geochemistry, and genesis of tungsten-tin deposits in the Baigianhu District, Northern Kunlun Belt, Northwestern China. *Economic Geology*, 2014, vol. 109, no. 6, pp. 1787–1799.
- Shedd K.B. Tungsten. [Advance Release]. *2015 Minerals Yearbook*. U.S. Geological Survey. November 2014. 22 p. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tungsten/myb1-2015-tungs.pdf> (accessed: 12 November 2018).
- Dvořáček J., Sousedíková R., Vrátný T., Jureková Z. Global tungsten demand and supply forecast. *Archives of Mining Sciences*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 3–12. DOI: 10.1515/amsc-2017-0001.
- Dvořáček J., Sousedíková R., Krzemien A., Sanchez A.S. Focus on some aspects of market price trends for tungsten. *Acta Montanistica Slovaca*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 126–135.
- U.S. Geological Survey. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs> (accessed: 12 November 2018).
- British Geological Survey (BGS). Available at: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html> (accessed: 12 November 2018).
- Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2016–2017 godu» [State report «On the 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: 12 November 2018).
17. *Federalnaya tamozhennaya sluzhba Rossii* [Federal Customs Service Russian Federation]. Available at: <http://stat.customs.ru/analytics/> (accessed: 12 November 2018).
18. *Kazdata*. Marketingovy biznes-spravochnik Kazakhstana [Marketing business directory of Kazakhstan]. Available at: <https://kazdata.kz/> (accessed: 20 January 2018).
19. *Obzor rynka volframa v SNG* [Overview of the tungsten market in the CIS]. Moscow, Infomayn, 2017. 274 p.
20. *TrendEconomy*. Available at: <http://data.trendeconomy.ru/dativiewer/trade/statistics/> (accessed: 12 November 2018).
21. Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu. Regulirovanie importa deficitnogo dlya Rossii mineralnogo syrya [Import regulation for mineral raw materials that are lacking in Russia]. *Gornyy zhurnal*, 2005, no. 9–10, pp. 53–56.
22. Khatkov V.Yu. About commodity flows of import-dependent mineral products. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2017, no. 5, pp. 66–71. In Rus.
23. 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.
24. *Gosudarstvennaya korporatsiya «Rostekh»*. *Godovoy otchet za 2017 god. Partner v razviti. 10 let ustoychivogo rosta* [State Corporation «Rostec». Annual report 2017. Partner in development. 10 years of sustainable growth]. Moscow, Rostekh, 2018. 131 p. Available at: <https://rostec.ru/upload/iblock/609/60954456d3f675625e60918653ceb028.pdf> (accessed: 26 November 2018).
25. Samatova L.A., Shepeta E.D., Alushkin I.V. Prospects of introduction of the efficient techniques of ore preparation in processing of tungsten poor ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2016, no. S21, pp. 316–327. In Rus.
26. Khanturgaeva G.I. Combined technologies of complex processing of difficult-to-enrich molybdenum and tungsten ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2009, vol. 14, no. 12, pp. 478–494. In Rus.
27. Butukhanov V.L., Khromtsova E.V. Study of conditions of producing certified tungsten concentrates of Lermontovski deposits. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2 (37), pp. 73–78. In Rus.
28. Ivankov S.I., Litvintsev E.G., Petkevich D.G. Problemy sozdaniya sovremennykh ekologicheskikh malonapryazhennykh tekhnologiy pererabotki kompleksnykh volframovykh rud i puti ikh resheniya [Problems of developing modern environmentally low-stress technologies of processing complex tungsten ores and ways of their solution]. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchey sredy. Obzornaya informatsiya* [Scientific and technical aspects of saving the environment. Review]. Moscow, VINITI Publ., 2013. Iss. 3, 138 p.
29. Suarez S.A., Krzemien A., Riesgo F.P., Iglesias Rodriguez F.J., Sanchez L.F., de Cos J.F.J. Investment in new tungsten mining projects. *Resources Policy*, 2015, vol. 46, pp. 177–190. DOI: 10.1016/j.resourpol.2015.10.003.
30. Krzemien A., Riesgo F.P., Suarez S.A., Diego A.I. Beyond the pan-European standard for reporting of exploration results, mineral resources and reserves. *Resources Policy*, 2016, vol. 49, pp. 81–91. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.04.008.
31. Singh G.R.P. Modern hydrometallurgical production methods for tungsten. *Journal of Metals*, 2006, vol. 58, no. 9, pp. 45–49.
32. Gaur R.P.S. Modern methods of hydrometallurgical production of ammonium paratungstate (APT). *Proc. of the 8th International Conference on Tungsten, Refractory and Hardmaterials 2011*. San Francisco, CA, United States, 18–21 May 2011. pp. 21–216.
33. Preyskurant N 10–01 «Tarify na perevozki Грузов i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye rossiyskimi zheleznymi dorogami» [Price list N 10–01 «Tariffs for transportation of goods and infrastructure services performed by Russian Railways»]. Postanovlenie Federalnoy energeticheskoy komissii RF ot 17.06.2003 N 47-t/5 (red. ot 05.09.2017) [RF Federal Energy Commission order no. 47-t/5, 17.06.2003]. *Byulleten normativnykh aktov federalnykh organov ispolnitelnoy vlasti* (prilozhenie k № 30, 28.07.2003). [Bulletin of standard acts of Federal executive authority].
34. Boyarko G.Yu., Khatkov V.Yu. Global market of tin and modern state of tin industry in Russia. *Tsvetnye metally*, 2018, no. 1, pp. 47–55. In Rus. DOI: 10.17580/tsm.2018.01.06.
35. Plan meropriyatiy po importozameshcheniyu v stankoinstrumentalnoy promyshlennosti Rossiyskoy Federatsii [Plan of measures for import substitution in the machine tool industry of the Russian Federation]. *Utverzhden Prikazom Ministerstva promyshlennosti i trgovli RF*. 31 Marta 2015 g. N 650 [Approved by the order of the Ministry of Industry and Trade of the RF, 31.03.2015, no. 650].

Received: 22 December 2018.

#### Information about the authors

**Vitaly Yu. Khatkov**, head of the Department, Gazprom; postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

УДК. 551.763.1

## ГЕОЛОГИЯ АПТ-АЛЬБСКИХ ПОРОД КАРБОНАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ОСАДОЧНОЙ ГРУППЫ КОГОЛЛО И ПОСЛЕДСТВИЯ АНОКСИДНЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ БАСЕЙНА МАРАКАЙБО (СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ ЧАСТЬ ЮЖНОЙ АМЕРИКИ)

Аура Самид Гарсия Бальса,  
garciaas@hw.tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью проведения дополнительных поисково-разведочных работ на нефть и газ в северо-западной части нефтегазоносного бассейна Маракайбо, которые позволят повысить рентабельность разработки действующих месторождений и расширят возможности поиска новых залежей углеводородов в западной части Венесуэлы. Анализируемая осадочная толща Коголло, представленная формациями Апон, Лижур и Марака, включает промышленно продуктивный интервал, который слагают карбонатные отложения и нефтематеринские породы мелового периода. Литологическая характеристика нефтематеринских пород указывает на аноксидные океанические события при формировании формации Апон. Первое событие соотносится с осадконакоплением пачки Мачикес, а второе – с кровлей пачки Пиче. Обе пачки принадлежат к формации Апон. Рассматриваемые события способствовали формированию нефтематеринских пород высокого генерационного потенциала углеводородов, чем объясняется интерес данного исследования.

**Основной целью** исследования является изучение фациальных условий формирования отложений формации Апон в разрезе обнажения континентальной части бассейна Маракайбо и их корреляция с ближайшими глубокими скважинами для определения стратиграфического местоположения коллекторов и их возможной связи с интервалами потенциальной нефтематеринской породы.

**Объекты:** обнажения карьера Цементос Кататумбо С.А. в горной системе Периха, где выделяется карбонатная толща нижней группы Коголло, а также глубокие поисковые скважины X-1, X-15, X-21, X-14 и X-23. Имеющиеся варианты корреляции отложений в обнажении горной системы Периха недостаточно обоснованы и требуют уточнения.

**Методы:** седиментологический и геохимический анализы карбонатных пород группы Коголло в пределах в карьере Цементос Кататумбо С.А., штат Сулия, Венесуэла, включающие макро- и петрографическое описание пород, биостратиграфический анализ, изучение содержания общего органического углерода в породе, данных гамма-каротажа по разрезу обнажения и в глубоких скважинах.

**Результаты.** Выделено 14 микрофаций, связанных с условиями седиментации в пределах склона карбонатного бассейна. В последовательности переслаивания отложений формации Апон выделяются участки максимальной трансгрессии моря и скрытые стратиграфические несогласия. Аппроксимированная и оценочная корреляция, учитывающая стратиграфию, литофации и данные гамма-каротажа, была проведена в обнажении карьера Цементос Кататумбо С.А. и сопоставлена с разрезами нефтяных скважин X-1, X-15, X-21, X-14 и X-23.

### Ключевые слова:

Карбонатная платформа, группа Коголло, формация Апон, бассейн Маракайбо, АОС 1а, АОС 1б.

### Введение

Группа Коголло представляет собой классическую карбонатную платформу, образованную на седиментационном склоне в результате очень быстрой трансгрессии моря с конца барремского яруса до начала аптского яруса. Система формировалась в течение аптского и альбского ярусов, в бассейне Маракайбо, расположенном на северо-западе Венесуэлы (рис. 1).

Аноксидные океанические события (АОС) рассматриваемой территории, характеризующиеся значительным снижением кислорода в придонной воде, были впервые описаны в качестве переходных периодов морской аноксии и повсеместного отложения органического материала богатого углеродом в течение мелового периода [1]. Наличие многочисленных прослоев черного сланца предполагает, что аноксидные океанические события, выделяемые как АОС-1, происходили неоднократно в течение среднего мелового периода. По стратиграфической приуроченности можно выделить четыре уровня: АОС-1а (ранний апт), АОС-1б (на границе апта-альба), АОС-1в (средний альб) и

АОС-1д (поздний альб) [2]. Рассматриваемые отложения кислородного голодания включают не только нефтеперспективные гемипелагические черносланцевые толщи [3], но и тонкие, богатые органическим веществом, сланцы, переслаивающиеся с циклическими мелководными морскими карбонатами [4].

Группу Коголло в западной Венесуэле, представленную формациями Апон, Лижур и Марака, составляет сообщество карбонатных отложений и нефтематеринских пород мелового периода. Объектами изучения настоящей статьи являются нефтематеринские отложения формации Апон, соответствующие уровням аноксидной седиментации АОС-1а (пачка Мачикес) и АОС-1б (пачка Пиче).

Эти отложения выявлены в скважинах восточного побережья бассейна Маракайбо. На внутренней карбонатной платформе отложения уровня АОС-1а (пачка Мачикес) формировались на финальной стадии трансгрессии, а в последующий импульс расширения морского бассейна в конце апта (уровень АОС-1б) отлагалась пачка Пиче [5].

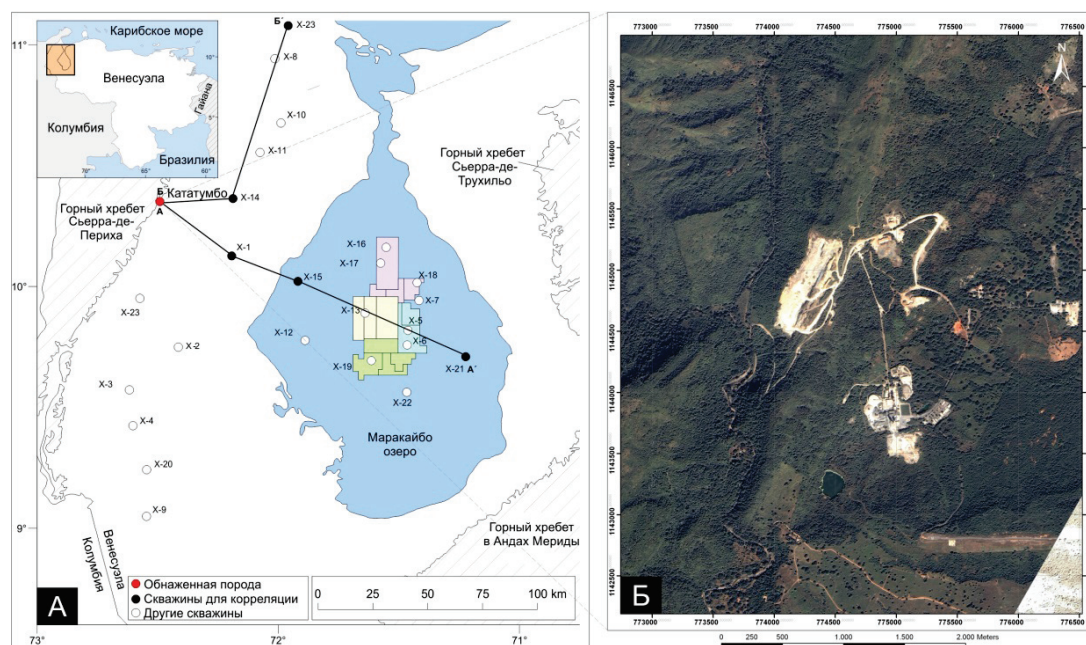


Рис. 1. (А) Карта местоположения нефтяных скважин и обнажения Карьер Цементос Кататумбо С.А. в западной части бассейна Маракайбо; (Б) спутниковый снимок Иконос карьера в Цементос Кататумбо С.А.

Fig. 1. (A) Map of locations of oil wells and outcrop of quarry Cementos Catatumbo S.A. in western part of Maracaibo Basin; (B) Satellite image Ikonos from the quarry of Cementos Catatumbo S.A.

Проведённые исследования обнажения подтвердили, что осадочные образования формации Апон в седиментационном бассейне Маракайбо представляют собой самостоятельный нефтегазоносный комплекс, аналогичный традиционному нефтегазоносному комплексу формации Ла Луна, в котором сосредоточено 98 % общих объёма запасов нефти в бассейне Маракайбо [6], а сама формация Ла Луна считается крупнейшей нефтепроизводящей толщей на Земле [7, 8].

В бассейне Маракайбо проведены исследования, связанные с осадкообразованием, диагенетической историей, типами пористости и трещиноватости меловых карбонатных отложений группы Коголло [5, 9, 10 и др.]. Однако геологическое изучение обнажений в Карьере Цементос Кататумбо С.А. не проводилось.

В статье рассматриваются вопросы изучения седиментации карбонатных пород апт-альбского возраста в западной части бассейна Маракайбо (район Карьера Цементос Кататумбо С. А.), включающие:

- 1) определение фаций и ассоциаций осадочных пород, позволяющее постулировать седиментологическую модель изучаемой осадочной толщи для дальнейшего прогноза ее пространственного распространения;
- 2) оценку диагенетических процессов и их влияние на коллекторские свойства продуктивных пластов;
- 3) сопоставление информации по поверхностным обнажениям пород и данным глубоких скважин с целью уточнения общей картины седиментации рассматриваемой территории.

### Геологическая обстановка

Карибский бассейн – это зона взаимодействия пяти тектонических плит: плита Наска, плита Кокос, Южно-американская плита, Северо-американская плита и Карибская плита. Бассейн Маракайбо расположен на северо-западном крае плиты Южной Америки и охватывает большую часть Западной Венесуэлы, в так называемом блоке Маракайбо. Тектонический блок ограничен разломом Боконо в Мериде Анды, разломами системы Санта Марта-Букараманга, расположенными к западу от горной системы Периха в Колумбии, и системой разломов Оса-Анконе, простирающейся с запада на восток и идущей параллельно границе Карибской плиты [7, 11]. Взаимодействие Карибской плиты, Южно-Американской плиты и плиты Наска продвигает этот блок на северо-запад по отношению к Южной Америке. Бассейн Маракайбо – это коса прибрежной полосы площадью 50000 км<sup>2</sup> и с суммарным объёмом отложений 250000 км<sup>3</sup>, залегающих на древнем фундаменте [12]. Историю тектонической эволюции бассейна Маракайбо можно разделить на пять основных этапов. Первый этап – развитие в меловой период пассивной окраины континента; второй – формирование прибрежной полосы (поздний палеоцен-ранний эоцен), третий – позднеэоценовый тектонический прогиб и складчатость смятия, четвёртый – поднятие хребта Периха и блоковая складчатость (олигоцен-поздний миоцен); пятый – тектоническое влияние горной системы Анд (от плиоцена до настоящего времени) [13–15]. Геодинамическое развитие района охватывает длительный период, од-



нако в представленной статье будет рассматриваться только ранний этап его эволюции.

После этапа континентального рифтогенеза и обширной субаэральной эрозии регион в начале мелового периода вошел в период относительного тектонического покоя и, как минимум до сеномана, представлял собой устойчивую платформу [13, 16, 17]. В барремском ярусе произошел общий подъем относительного уровня моря, в результате которого формируются отложения песков и конгломератов формации Рио-Негро [10]. Дальнейшая трансгрессия моря привела к тому, что терригенные отложения на обширных территориях сменились мелководными осадками карбонатной платформы с редким присутствием терригенных отложений, представленных группой Коголло [10, 18], которая включает формации Апон, Лижур и Маракас [19].

Формация Апон (апт-нижний альб) состоит из последовательности окаменелых известняков, с меньшей пропорцией иловых известняков (локально доломитизированных), доломитов и кремнисто-обломочных пород. В пределах центральной и северо-западной части бассейна Маракайбо формация представлена тремя пачками: Тибу, Мачикес и Пиче [20]. На формации Апон со стратиграфическим перерывом [19] залегает формация Лижур (средний альб), которая состоит из известково-глауконитовых кварцевых песчаников, глауконитовых печаных известняков, серых известняков, ракушечных известняков и некоторых сланцев [12]. Формация Маракас (поздний альб-сеноман) представлена массивными ракушняковыми и органогенно-обломочными известняками, преимущественно представленными *Ostrea* и *Trigonia*, с тонкими прослоями мергелей и глинистых сланцев, редким присутствием ооидов и покрытых зерен.

В сеноманский и туронский века бассейн Маракайбо испытывал неравномерное погружение, вызванное, вероятно, возобновлением тектонических подвижек блокового характера по разломам юрского периода, при этом прогибание западной части бассейна опережало восточную. Морская трансгрессия в позднем альбе-сеномане охватила большую часть площади платформы. Погружение дна седиментационного бассейна ниже фотической зоны предопределило смену карбонатного осадконакопления карбонатно-глинистым, что привело к формированию доманиковых отложений формации Ла Луна, являющейся нефтематеринской породой мирового класса и относящейся к уровню АОС-2 [5, 21, 22].

В дальнейшем, в результате тектонической активизации, произошло поднятие хребтов западной и центральной Колумбии, после чего между Карибской и северо-западным краем Южноамериканской плит в позднем палеоцене – среднем эоцене образовалась прогнутая зона осадконакопления, где толщина флювиально-дельтовых осадков достигает пяти километров.

Дальнейшее сближение тектонических плит в эоцен-олигоцене обусловило деформацию накопившейся толщи осадков [7, 14, 23].

### Методология

Формация Апон изучалась в 226 метровом интервале обнажения в северо-западной части бассейна Маракайбо. Исследование охватывает седиментологические характеристики формации Апон. Определение фаций осадконакопления и условий их формирования проводились на макро-скопическом и микроскопическом уровнях с учетом фаунистических данных. Для этого в полевых условиях после литологического описания обнажения из 70 интервалов, распределенных по всему стратиграфическому разрезу, были отобраны образцы и изготовлены петрографические шлифы. Седиментологическая интерпретация окружающей среды и концептуальная модель осадконакопления базировались на критериях, упомянутых в работах [24, 25]. По результатам петрографических исследований [26], учитывающих типы цементов (его морфологию и компоновку), характер различных диагенетических преобразований (микритизация, стилолитизация, уплотнение, замещение минералов) была определена парагенетическая последовательность формирования рассматриваемых отложений.

Кроме того, было отобрано 11 проб для исследований с помощью Rock-Eval 6 для определения значения общего органического углерода (массовый %), которое затем было проверено повторным анализом. Все образцы были проанализированы в геологической лаборатории Эль Чауре (PDVSA S.A.).

При сопоставлении разреза обнажения с разрезами нефтяных скважин X-1, X-15, X-21, X-14 и X-23 использованы седиментационные отчеты по этим скважинам, составленные разными авторами, работавшими над проектами PGO Golfo de Venezuela и PGP Guarani (PDVSA).

На основе информации, полученной при изучении геологии обнажения и данных по скважинам, выполнены петрографические описания и проведен анализ диагенетических изменений пород, что позволило определить условия накопления и сохранения осадочных отложений в изучаемом регионе.

Это, в свою очередь, дало возможность установить взаимосвязь строения глубинных разрезов формации Апон с разрезом обнажения. Для более точной стратиграфической привязки анализируемых данных по скважинам в разрезе обнажения было проведено исследование гамма-излучения с помощью сцинтилляционного спектрометра. Показания снимались с интервалом в 50 сантиметров.

### Фации осадконакопления

Фации, описанные на макроуровне, представляют собой первое приближение для интерпретации стратиграфической летописи. Было выделено шесть типов литофаций (ЛФТ):



**ЛФТ-1: Массивный известняк.** Эта фация структурно содержит мадстоун, вакстоун и пакстоун. Для неё характерно беспорядочное расположение обломков трещиноватого и перекристаллизованного ракушечника. В основном это двустворчатые и брюхоногие моллюски. Локально они представляют собой нарастание серпулоидов, изолированных трубок и/или образованных ими колоний. Отмечается хорошая стратификация по видимому составу.

**ЛФТ-2: Желвакообразный известняк** структурно представлен вакстоуном и пакстоуном. Подобные прослои мощностью 10–20 см имеют субпараллельное переслаивание. Представлены многочисленными обломками раковин, главным образом двустворчатых и брюхоногих моллюсков с малым содержанием пирита.

**ЛФТ-3: Волнистый известняк** характерен для верхней части пачки Пиче. В породах наблюдается нерегулярное и волнистое переслаивание с частотой 10–30 см, свойственно наличие микростилолитов и стилолитов.

**ЛФТ-4: Ламинарный известняк** состоит из интервала мадстоуна с тонкой слоистостью (слоистый вид). Фаунистические осадки представлены аммонитами. Отмечается наличие включений известковой гальки, очень округлых, с диаметром 20–30 см.

**ЛФТ-5: Доломитовый известняк** имеет зернистую структуру частиц илового размера, хорошо сортированных и окатанных, с отчетливой слоистостью. Контакты поверхностей разнообразны. Некоторые интервалы, особенно в направлении кровли пачки Мачикес, имеют маленькие прожилки, заполненные нерастворимым материалом. На некоторых участках встречается фауна аммонитов.

**ЛФТ-6: Аргиллит/алевролит.** Литофация сложена, преимущественно, глинистым материалом с незначительным количеством кварца. Для пород характерна тонкая слоистость. Выделяются массивные тонкослоистые разности без следов биотурбации с непрерывной и прерывистой слоистостью.

Диагностика микрофаций проводилась на основе анализа окаменелостей и оценке структурных компонентов (как скелетных, так и нескелетных), цемента и матрицы, что позволило выделить четырнадцать типов микрофаций (МФТ). Интерпретируемые фации делятся на три фациальные ассоциации: 1 – внутренний склон; 2 – средний склон; 3 – наружный склон осадочного бассейна.

Ассоциация микрофаций для внутреннего склона

Отложения микрофаций включают микрокристаллические доломиты, мадстоун и вакстоун (флаутстоун), двустворчатых моллюсков с гастроподами, вакстоун–пакстоун биокластический с преобладанием моллюсков. Широкое распространение имеют зерна с микривыми покрытиями, большинство из которых несут признаки биоэрозии.

**МФТ-1: микрокристаллический доломит.** Представлен отчетливо зональными кристаллами доломита (темнее в центре и с прозрачными краями). Кристаллы являются идиоморфными ромбоэдрами. Кальциты с низким содержанием железа не доломитизированы. В первичной структуре иногда сохраняются остатки моллюсков и остракод. В тонких прослоях отмечаются следы органического вещества. Железистые минералы имеют широкое распространение. Пирит и фосфаты встречаются редко. Пористость, образованная в результате растворения кристаллов доломита, в определенных участках достигает 15 %, но чаще не превышает 5 %.

Этот тип микрофации характерен для сублиторали и литорали с проявлением волновой деятельности [24], где интенсивная доломитизация обычно происходит во время ранней стадии диагенеза [27].

**МФТ-2: мадстоун/вакстоун с матрицей доломитизации.** Микрофация состоит из иловой карбонатной породы с матрицей доломитизации. Ромбоэдрические кристаллы (~ 0,2 мм) варьируют в пределах 5–10 и до 30 %. Доломитизация проявляется в виде пятен или распространяется в матрице. Биокласты, предположительно, состоят из моллюсков, брахиоподов и иглокожих и составляют примерно 20 %. Отмечается фосфатизация отдельных фрагментов и локальное окварцевание. Иловый характер этой микрофации и появление фрагментов морских беспозвоночных отражает осадконакопления в условиях приливно-отливной зоны спокойных вод.

**МФТ-3: аргиллит/алевролит.** Породы темно-серого, коричневого или зеленовато-серого цвета представлены глинистым материалом, с незначительной примесью кварца илового размера и карбонатного вещества. Присутствует нерастворимый материал (чаще глины и углеводороды). Эти микрофации относятся к ЛФТ-6, которая представлена тонкими, массивными прослоями непрерывного или прерывисто-параллельного прослеживания по разрезу. Наиболее вероятной обстановкой седиментации отложений может быть приливно-отливная равнина.

**МФТ-4: мадстоун с включениями двустворчатых моллюсков.** Характеризуется наличием в основной массе породы удлиненных и линзовидных прослоев светлого, серовато- и темно-коричневого известняка и фрагментированных скелетов беспозвоночных (до 10 %), представленных брахиоподами, двустворчатыми и брюхоногими моллюсками, по раковинам отмечается пиритизация и окварцевание. Обилие известкового ила, очевидное отсутствие текстур волочения и фаунистические остатки указывают на формирование отложений в условиях низкоэнергетической подводной среды, вероятно, в условиях приливной зоны с пологим наклоном дна.

**МФТ-5: мадстоун с пелоидами.** Отложения соответствуют интервалу в пачке Пиче, для которого

характерны коричнево-серые иловые карбонатные породы с пелоидами (~0,39 мм). Отмечается хорошая окатанность и сортировка гранул, обилие пелоидов, сцементированных илом, что указывает на зону отложения с ограниченным доступом кислорода, вероятно, в пределах лагуны.

**МФТ-6: вакстоун (флаутстоун) двустворчатых и брюхоногих моллюсков.** Содержит разделенные, отшлифованные фрагменты раковин с истертыми оболочками (>6 мм) и хорошей окатанностью, главным образом представленные двустворчатыми и брюхоногими моллюсками. Фрагменты скелета с отверстиями являются редкими. Матрица состоит из микритов. Локально наблюдаются стилолитовые швы. Фосфаты и железистые минералы встречаются редко. В обнажении первичная седиментационная структура не определяется. Интерпретация условий седиментации рассматриваемых отложений неоднозначна. Смесь известкового ила, ассоциация окаменелостей и отсутствие осадочных текстур указывают на осадконакопление рассматриваемой микрофации в условиях мелководья при слабой волновой деятельности. Однако вариации в разделенных фрагментированных истертых моллюсках указывают на возможность транспортировки фрагментов в среде с высокой энергией, например, течений или волн, вызванных штормами, что может быть связано с сублитеральной морской средой, защищенной лагунами во внутренней части склона.

**МФТ-7: биокластовые вакстоун-пакстоун с преобладанием моллюсков.** Микрофация представлена илистыми и зернистыми известняки с обильными обломками моллюсков (> 45 %), главным образом двустворчатых, реже гастропод, остракод и иглокожих. Раковины претерпели биогенетические изменения (например, микритизация, наличие следов воздействия на осадок микроорганизмов и др.), растворение и минеральное новообразование (формирование агрегатов друз). В некоторых биокластических массивах отмечается относительно одинаковое заполнение пор. Присутствуют железистые минералы и фосфаты. Локально фиксируется пиритизация пород, окварцевание и интракластеризация. Интракласты указывают на предшествующую их образованию консолидацию породы, с указанием седиментации в условиях умеренной или высокой энергий. Фрагментарный характер скелетов беспозвоночных, возможно, связан со штормами. Эта микрофация может формироваться в обстановке внутреннего склона.

**МФТ-8: мадстоун-вакстоун/вакстоун-пакстоун двустворчатых моллюсков и иглокожих с бентосными фораминиферами.** Эта буровато-коричневый иловая микрофация представлена в основном двустворчатыми и брюхоногими моллюсками, иглокожими и, в некоторой пропорции, местными обитателями – бентосными фораминиферами и серпулоидами. Иловый известняк содержит остатки игл губок. Части кремнистых игл замещены пиритом. В большом количестве присут-

ствуют железистые минералы. Эти микрофации относятся к МФТ-2. Наличие донной фауны характерно для приливно-отливной зоны или приливной зоны в среде лагуны с хорошей циркуляцией воды.

Ассоциация микрофаций среднего склона

Определенные микрофации включают пакстоун двустворчатых моллюсков и иглокожих, грейнстоун иглокожих и кортоиды. В этих микрофациях очень распространены эффекты уплотнения, микростилолиты, полиморфные превращения арагонита в кальцит, пиритизации пород и в целом переработка частиц.

**МФТ-9: пакстоун пелоидов с иглокожими.** Он характеризуется коричневыми известняками и в меньшей степени известковым илом. Пелоиды (0,36 мм) встречаются очень часто (30–50 %) с хорошей окатанностью и сортировкой. Скопления иглокожих и кортоиды довольно распространены (10–30 %). Большая часть биокластов обрастает каемками кальцитового вещества, особенно иглокожие.

Природа этих микрофаций и ассоциации с включениями иглокожих свидетельствуют о водной обстановке, возможно, внутренние бары в лагуне, где поверхность осадконакопления выше нормального волнового базиса, при переходе от внутреннего к среднему склону платформы.

**МФТ-10: пакстоун двустворчатых моллюсков** состоит из светло-серо-бурых известняков, с обилием раковин двустворчатых моллюсков, в основном с остракодами (>50 %). Преимущественно наблюдаются обломки, но встречаются целые раковины с признаками растворения. Размер раковин может варьировать от нескольких миллиметров до 4 см в длину. Внутренние полости зацементированы или заполнены иловым карбонатным материалом. В этих микрофациях очень распространены эффекты уплотнения и микростилолиты (обычно заполненные нерастворимым материалом). Трещины более одного миллиметра имеют широкое распространение. Как правило, они заполнены кальцитом со следами растворения. В большом количестве присутствуют железистые минералы. Эти микрофации были интерпретированы [10] как биострома двустворчатых моллюсков в области среднего склона.

**МФТ-11: пакстоун иглокожих и кортоиды** состоят из известняков с небольшим количеством известкового ила, с преобладанием иглокожих и кортоидов (в основном конструктивных), и в меньшей пропорции интракластов (<2 мм), моллюсков (гастропод) и остракод. Пирит, глауконит и железистые минералы очень распространены в виде частиц или рассеяны в матрице. Наблюдается и частичная доломитизация и доломитизация биокластов. Большинство иглокожих с фрагментарным обрастанием кальцита по периферии выделений. Локально фиксируется образец с большим скоплением иглокожих. Пористость превышает 5 %.

Низкое содержание микритового ила, ассоциация с интракластами, обломки иглокожих, моллюсков и переработанные биокласты указывают на условия формирования пород с энергией от умеренной до высокой, где поток воды становится турбулентным. Это может соответствовать условиям седиментации внутреннего бара лагуны, около и выше нормы волнового базиса, в обстановке среднего склона платформы.

Ассоциация микрофаций для наружного склона бассейна

Обнаруженные микрофации представлены мадстоун-вакстоуном с пелагическим планктоном фораминифер. В целом отсутствие осадочных текстур, связанных с течениями и волнами, свидетельствует об отложении этих микрофаций под воздействием гемипелагических и пелагических процессов.

**МФТ-12:** мадстоун-вакстоун с пелагическим планктоном фораминифер. Соответствует известняковому илу с тонкими включениями битума. Под обычным светом видна параллельная слоистость. Прослойки слагают планктонные животные и окаменелости открытого моря (например, аммонитов). В пелагических глинах, а также в скелетных частицах распространен фосфатный материал. Пористость (<1 %) представлена микротрещинами. Преобладание пелагических мадстоунов с различным количеством планктонных микрофоссилий и нектонных окаменелостей указывает на глубоководную седиментацию, а наличие плоскопараллельной слоистости – на отложение осадков ниже базиса штормовых волн на глубинах более 100 м, в пределах наружного склона бассейна.

**МФТ-13:** вакстоун кальцисферы. Относится к пачке Пиче и состоит из микрофоссилий сферической формы, часто указывая на известняковые стены в микритовой матрице с нерастворимым материалом. Характерна параллельная слоистость. Кальцисферы, относящиеся к мезозою, связаны с открытой морской средой, в то время как домезозойские ограничиваются мелководной средой [24]. Наличие многочисленных кальцисфер, ассоциация с органическим веществом и параллельная слоистость предполагает формирование пород в глубокой и/или дистальной олигофотической зоне на наружном склоне бассейна.

**МФТ-14:** мадстоун-вакстоун с нектонной фауной. Выделена в пачке Пиче и включает известняки с обломками гастропод, остракод, иглокожих и в меньшей степени нектонных окаменелостей (например, аммонитов). В некоторых фрагментах иглокожих присутствуют фосфатизированные остатки и пирит. Локально кристаллы доломита распространены в матрице. Эти микрофации относятся к МФТ-3, где на отметке 200,43 м была найдена аммонитовая фауна (5 см), свидетельствующая об условиях седиментации ниже штормового базиса в пределах наружного склона бассейна.

**Таблица 1.** Соотношение осадочных лито- и микрофаций формации Апон Группы Коголло, западной части бассейна Маракайбо

**Table 1.** Relation of sedimentary litho-microfacies of the Apón Formation of the Cogollo Group, western region of the Maracaibo Basin

Литофации (ЛФТ) Lithofacies	Микрофации (МФТ) Microfacies
ЛФТ-1: Массивный известняк Massive limestones	МФТ-7: биокластовые вакстоун-пакстоун с преобладанием моллюсков wackestone-packstone of mollusks МФТ-9: пакстоун пелоидов с иглокожими packstone of peloids and sponge spicules МФТ-11: пакстоун иглокожих и кортоиды packstone of sponge spicules and cortoids
ЛФТ-2: Желвакообразный известняк Nodular limestones	МФТ-4: мадстоун с включениями двустворчатых моллюсков mudstone of bivalves МФТ-6: вакстоун (флаутстоун) двустворчатых и брюхоногих моллюсков wackestone (floatstone) of bivalves and gastropods МФТ-8: мадстоун-вакстоун/вакстоун-пакстоун двустворчатых моллюсков и иглокожих с бентосными фораминиферами mudstone-wackestone/wackestone-packstone of bivalves, sponges spicules and benthic foraminifers МФТ-10: пакстоун двустворчатых моллюсков packstone of bivalves
ЛФТ-3: Волнистый известняк Wavy limestones	МФТ-2: мадстоун/вакстоун с матрицей доломитизации mudstone wackestone with dolomitized matrix МФТ-5: мадстоун с пелоидами mudstone with peloids МФТ-13: вакстоун кальцисферы wackestone of calcispheres
ЛФТ-4: Ламинарный известняк Laminar limestones	МФТ-12: мадстоун-вакстоун с пелагическим планктоном фораминифер mudstone-wackestone pelagic with planktonic foraminifera МФТ-14: мадстоун-вакстоун с нектонной фауной mudstone-wackestone with nektonic fauna
ЛФТ-5: Доломитовый известняк Dolomitic limestones	МФТ-1: микрокристаллический доломит microcrystalline dolomite
ЛФТ-6: Аргиллит/алевролит Claystone/siltstone	МФТ-3: аргиллит/алевролит claystone- siltstone

#### Обстановки осадконакопления

Карбонатная последовательность нижней группы Коголло представляет собой совокупность осадочных пород, накопленных на полого наклонном рельефе вдоль континентальной окраины северо-запада Южной Америки [13, 28–30]. Ассоциация микрофаций и органическая составляющая осадка, включая его многообразие и тафономический характер, предполагает, что формирование толщ происходило преимущественно в условиях мелководной платформы при непрерывном воздействии волновых процессов. Согласно работе [10], отсутствие отложений гравитационных потоков



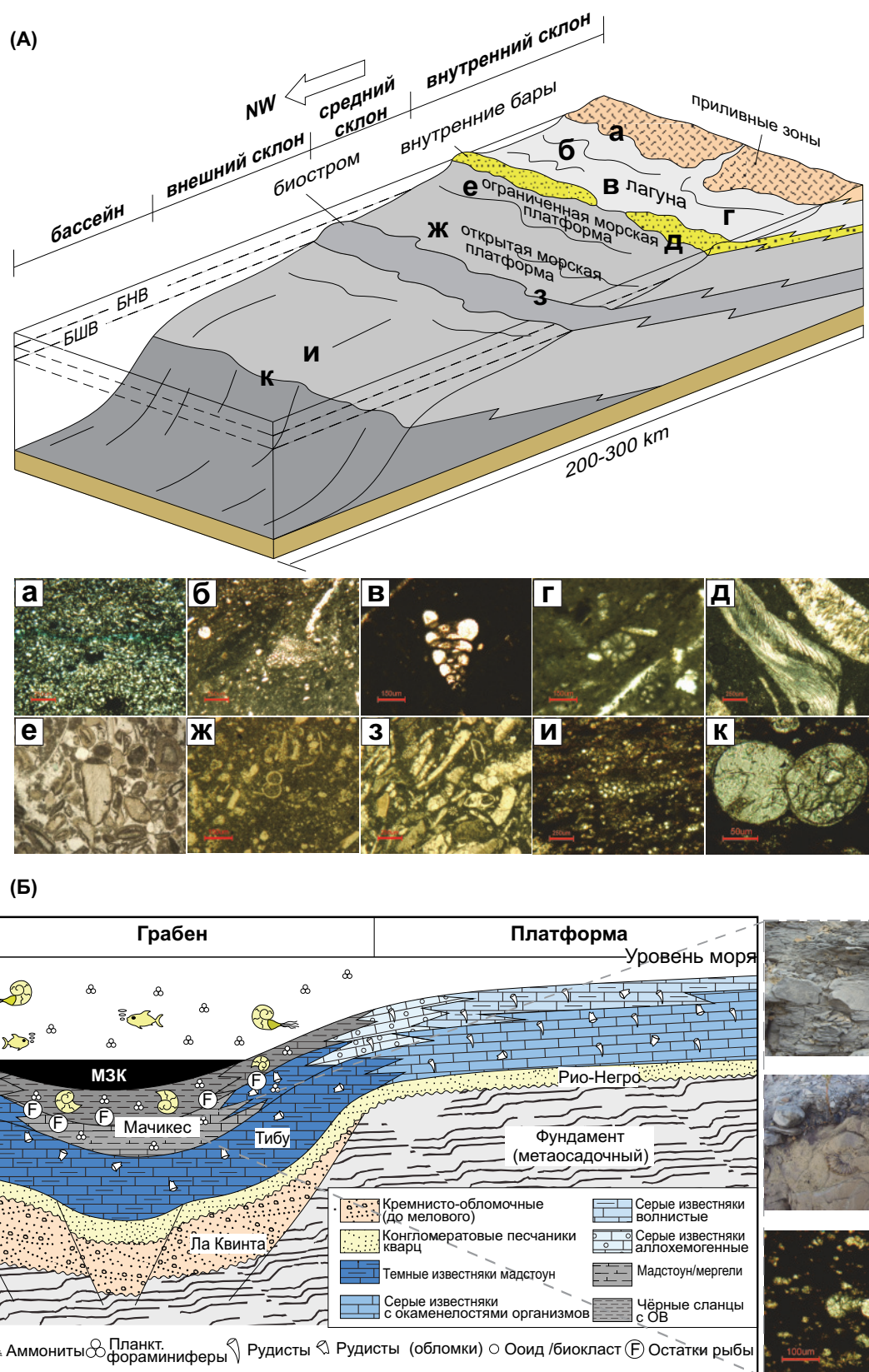


Рис. 2. (А) Идеализированная модель для обстановки осадконакопления в середине мелового периода склона Маракайбо и (Б) схематическая модель пачки Мачикес в зоне грабена

Fig. 2. (A) Idealized model for depositional environment in the mid-Cretaceous Maracaibo ramp and (B) diagrammatic model of the Mbr. Machiques in graben zones



свидетельствует о формировании осадков в условиях, при которых угол наклона поверхности напластования составляет не более 3°.

В результате выполненной систематизации изученные микрофации, представляющие различные седиментационные субобстановки, были соотнесены по фаціальным зонам. Основой проведенного распределения послужила схема, предложенная в работе [25], где для карбонатных склонов выделяется четыре зоны осадконакопления, соответствующие: внутреннему склону (1), среднему склону (2), внешнему склону (3) и открытому бассейну (4).

Учитывая местоположение изучаемого разреза в пределах грабенной зоны Мачикес, можно сделать вывод о формировании формации Апон в более глубоководных условиях и в восстановительной обстановке седиментации.

### Последовательность диагенетических преобразований формации Апон

Наиболее важным фактором в оценке потенциала нефтяного месторождения в карбонатных породах является анализ влияния диагенеза на пористость коллектора. Во многих уникальных нефтяных месторождениях, выявленных в карбонатных толщах, диагенез играет важную роль в повышении их пористости. В табл. 2 представлена последовательность диагенетических преобразований, выявленных в породах формации Апон при изучении.

Диагенетическая эволюция карбонатных пород представленного разреза может быть разделена на три этапа:

Первый этап – ранний диагенез или сингенетический, проявляющийся в осадочной среде при неглубоком захоронении, характеризующийся поч-

Таблица 2. Последовательность парагенетических преобразований в породах формации Апон

Table 2. Paragenetic sequence in the rocks of the Apón Formation

Диагенетическое событие Diagenetic event	Диагенетические стадии Diagenetic stages		
	Ранний диагенез Early diagenesis	Диагенез захоронения Burying	
		Сингенетический Syngenetic	Эогенетический Eogenetic
Микритизация и биоэрозия Micritization and boring			
Минеральное новообразование от арагонита до кальцита Neomorphism from aragonite to calcite			
Эквигранулярная и друзовая цементация Equigranular and drusy cementation			
Обрастание кальцитового вещества Syntaxial cementation			
Механическое уплотнение Mechanical compaction			
Инкорпорация зерен Interpenetration of grains			
Разрушение зерна Fracturing of grains			
Химическое уплотнение Chemical compaction			
Стилолиты Microstylolites			
Растворение Dissolving surfaces			
Окварцевание Silicification			
Фосфатизация Phosphatization			
Глауконитизация Glauconization			
Пиритизация Pyritization			
Доломитизация Dolomitization			
Ранняя доломитизация матрицы Early dolomitization of the matrix			
Доломитизация, связанная поверхностями растворения Dolomitization associated with dissolution surfaces			

ти одновременными изменениями (например, селективным растворением и повторным осаждением, биоэрозией, микритизацией), цементацией, глауконитизацией и фосфатизацией.

Второй этап – диагенез промежуточного захоронения или эогенетический (метеорный) (например, осаждение минералов в растворе или растворение карбонатного вещества).

Третий этап – диагенез глубокого захоронения или мезогенетический (например, цементация, механическое уплотнение, стилолитизация и трещинообразование).

Главные диагенетические процессы, которые, вероятно, повлияли на образование открытой пористости – это доломитизация, обусловившая образование поверхностей растворения, особенно в биокластической фации, трещинообразование (мезотрещины в фации без или с небольшим содержанием карбонатного ила, микротрещины в илистых фациях) и стилолитизация. Процессы снижения пористости обусловлены цементацией пор и трещин, а также механическим уплотнением осадка. Стилолитизация, как правило, уничтожает пористость, но во многих случаях образуется вторичная пористость.

Доломитизация в последовательности пород формации Апон варьируется от общей до избирательной. Последняя позволяет определять первичную структуру породы. На основе петрографических критериев и стратиграфического расположения доломиты данной последовательности можно рассматривать в качестве замещающего элемента, а их формирование, вероятно, произошло во время

условий неглубоководных захоронений. Напротив, доломит, связанный с поверхностями растворения и образующий правильные ромбовидные кристаллы, приуроченные к зонам химического уплотнения – стилолитам, указывает на позднюю стадию захоронения.

В изучаемом обнажении в последовательности пород наблюдается обширная система трещин, распространенных под разными углами. Ширина этих трещин варьируется от нескольких миллиметров до пяти сантиметров. Большинство трещин выполнены, главным образом, кальцитом. Аналогичные закономерности развития отмечены и для стилолитов, заполненных нерастворимым материалом. Одни трещины и заполняющий их материал предшествовали развитию стилолитов и миграции углеводородов. Другие трещины образовались после стилолитов и были заполнены углеводородами.

Наиболее важными разновидностями пористости, обнаруженными в породах формации Апон, являются:

- 1) вторичная пористость за счёт выщелачивания остатков организмов в ракушечнике;
- 2) трещинная пористость;
- 3) внутрикристаллическая селективная пористость (формируется в результате растворения во внутренних областях доломитовых ромбов);
- 4) межзерновая пористость;
- 5) канальная (порово-пустотная) пористость – не-селективная пористость, наблюдаемая по границам зерен доломита в верхней части изучаемого осадочного разреза.

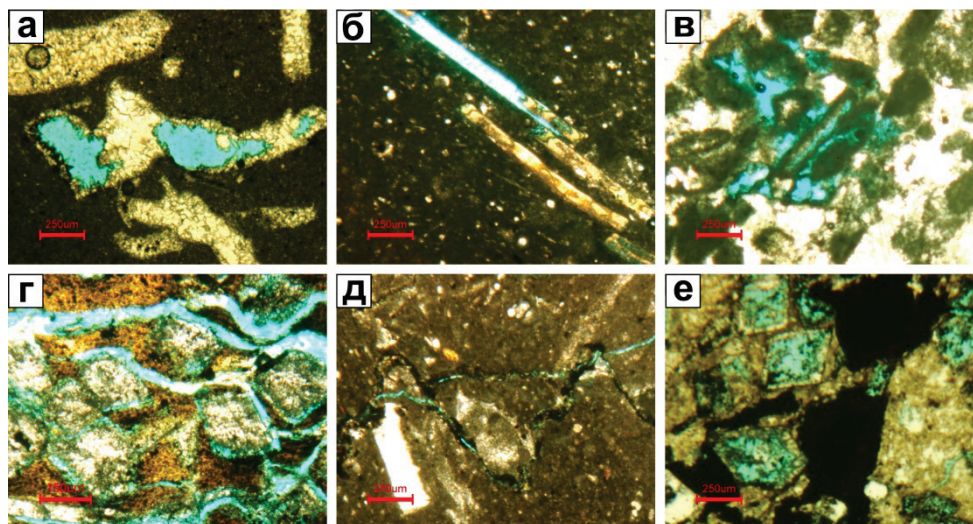


Рис. 3. Микрофотографии типов пористости отложений формации Апон: а) пачка Тибу: вторичная пористость за счёт выщелачивания ракушечника (частично восстановленная кальцитовым цементом); б) пачка Пиче: вторичная пористость за счёт выщелачивания ракушечника; в) пачка Пиче: межзерновая пористость; г) формация Лижур: неселективная канальная пористость; д) пачка Мачикес: стилолитовая пористость; е) пачка Пиче: внутрикристаллическая пористость. Фотографии шлифов без анализатора

Fig. 3. Types of porosity: а) Member Tibü – moldic porosity partially reduced by calcite cement; б) Member Piché – moldic porosity; в) Member Piché – intergranular porosity; г) Formation Lisure – non-selective channel porosity developed perhaps by dissolution and pressure solution processes; д) Member Machiques – stylolitic porosity; е) Member Piché – intracrystalline porosity. Microphotographs using parallel Nicols

Пористость рассматриваемой последовательно-сти отложений не превышает 5 %, однако ближе к кровле, где отмечается доломитизация, она достигает >10 %. Тем не менее, наблюдаемая пористость по разрезу изучаемой толщи недостаточна для формирования проницаемых пластов.

#### Океанические аноксидные события

Ранний мел был периодом с суперпарниковыми климатическими условиями и эпизодическими проявлениями океанических аноксидных событий. Предполагается, что быстрый приток вулканогенного CO<sub>2</sub> в атмосферу вызвал парниковый эффект, что, в свою очередь, привело к повышению уровня океана [31]. Отложения, обогащенные органическим углеродом, формировались в периоды морских трансгрессий [9]. АОС раннего альба, обусловленные дефицитом кислорода в океанических водах, усилили накопление морских осадков, богатых органическим материалом, сформировав основные нефтематеринские породы мирового значения [32, 33].

Пачка Мачикес образовалась в результате быстрой и обширной трансгрессии, охватившей почти весь бассейн Маракайбо. По результатам анализа массового процентного содержания общего органического углерода (ООУ) образцов, собранных автором в поле (табл. 3), его значения варьируются от 0,52 до 13,49 %, что соответствует градиции качества нефтематеринской породы от хорошего до превосходного, согласно [34].

Учитывая наличие в отложениях аммонитов *Deshayesites* аптского возраста [35], можно сделать вывод об океаническом аноксидном событии (АОС-1а) на мелководной платформе, в пределах которой в пачке Мачикес происходила генерация и миграция углеводородов. Вероятно, нефтяные месторождения формаций Рио-Негро (нижележащей) и Пиче (вышележащей) являются результатом этой миграции [9].

В наиболее приподнятой зоне пачки Пиче в обнажении есть доказательства проявления трансгрессии моря в виде наличия обильных остатков аммонитов и высокого значения гамма-каротажа.

Рассматриваемые отложения формировались в период проявления АОС-1б и характеризуются высокими значениями (до 13,49 %) содержания органического углерода в пачке Пиче, что свидетельствует о значительном углеводородном потенциале изучаемых пород.

Выполненное автором изучение разреза карьера Цементос Катакумба С.А. выявило трансгрессивное несогласие между карбонатными отложениями формации Апон (пачка Пиче) и терригенно-карбонатной формацией Лижу, что не противоречит геологическому строению рассматриваемых формаций в бассейне Маракайбо.

Наблюдаемые высокие коллекторские свойства отложений кровли пачки Пикче и их нефтенасыщенность позволяют сделать предположение, что углеводороды не обязательно были сгенерированы формацией Ла Луна. Возможно, их формирование

было связано с обогащенными органическим углеродом отложениями формации Апон [9].

Проведенные различными авторами исследования керн глубоких скважин бассейна Маракайбо с привлечением данных анализа ООУ, индекса водородора, температуры крекинга керогена (T<sub>max</sub>) и геохимического анализа позволяют считать пачки Мачикес и Пиче возможными нефтематеринскими породами [36, 37], способными генерировать углеводороды [9, 38, 39].

Таблица 3. Образцы разреза. Результаты общего органического углерода

Table 3. Outcrop samples. Total organic carbon results

Образец Sample	Имя Name	% ООУ % TOC	Статистическая обработка Statistical processing			Член Member	% конечный ООУ % final TOC
			Среднее число Average	σ	Относитель- ная ошибка Relative error		
1 1(R)	MI-AFL2-A MI-AFL2-A (R)	13,5070 13,4740	13,49	0,02	0,17	Мачикес Machiques	13,49
2 2(R)	MI-AFL4-A MI-AFL4-A (R)	17,7420 17,7790	17,76	0,03	0,15	Пиче Piche	17,76
3 3(R)	MI-AFL4-B MI-AFL4-B (R)	5,9226 5,9425	5,93	0,01	0,24		5,93
4 4(R)	MI-AFL4-C MI-AFL4-C (R)	8,0299 8,0982	8,06	0,05	0,60		8,06
5 5(R)	MI-AFL4-D MI-AFL4-D (R)	10,1750 10,1890	10,18	0,01	0,10		10,18
6 6(R)	MI-AFL4-E MI-AFL4-E (R)	8,1733 8,1649	8,17	0,01	0,07		8,17
7 7(R)	MI-AFL4-F MI-AFL4-F (R)	5,4601 5,4537	5,46	0,00	0,08	Мачикес Machiques	5,46
8 8(R)	MI-AFL2-113 MI-AFL2-113 (R)	0,6775 0,7025	0,69	0,02	0,17		0,69
9 9(R)	MI-AFL3-140 MI-AFL3-140 (R)	0,5092 0,5308	0,52	0,02	0,17		0,52
10 10(R)	MI-AFL3-156 MI-AFL3-156 (R)	3,6245 3,5755	3,60	0,05	0,60		3,60
11 11(R)	MI-AFL3-169 MI-AFL3-A169 (R)	1,2879 1,2921	1,29	0,00	0,08		1,29

ООУ: Общий органический углерод, TOC: total organic carbon. (R): образец, проанализированный в двух экземплярах, (R): sample, analyzed in dupliate. Относительная ошибка < 5 %, relative error < 5 %.

#### Среднемеловой стратиграфический разрез западной Венесуэлы

В процессе изучения представленная последовательность напластования отложений среднего мела в обнажениях участка Сьерра-де-Периджа была сопоставлена с результатами стратиграфиче-



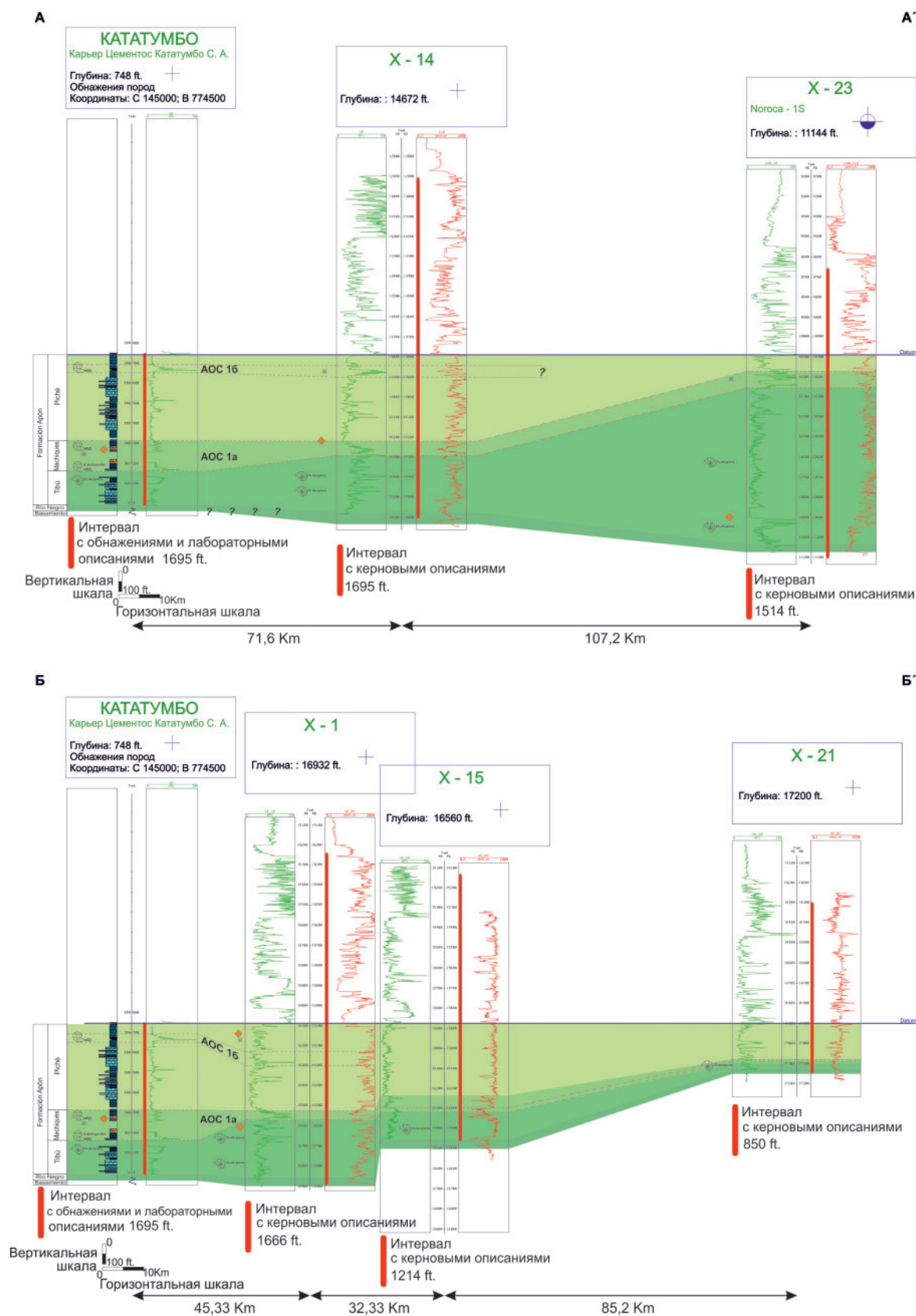


Рис. 4. Корреляция пород в обнажении Цементос Кататумбо С.А. с нефтяными скважинами по гамма-каротажу в западном бассейне Маракайбо на основе выделения маркирующих горизонтов (Разрезы А-А', Б-Б' соответствуют обозначению на рис. 1)

Fig. 4. Correlation of the outcrop section with oil wells by gamma ray log in western Maracaibo basin on the basis of marking horizons (Cuts A-A', B-B' correspond to Fig. 1)



ского расчленения аналогичного осадочного комплекса в скважинах X-1, X-15, X-21, X-14 и X-23 (рис. 4).

На рассматриваемом участке формация Апон ограничена в подошве контактом между континентальными (формация Рио-Негро) и морскими (пачка Тибу) отложениями. Дальнейшее повышение относительного уровня моря способствовало более глубоководной седиментации.

Средняя часть формации Апон, представленная пачкой Мачикес, формировалась в АОС-1а. Образование пачки соответствует максимальной фазе развития трансгрессии, что хорошо отражается повышенными значениями гамма-каротажа.

Последующая регрессия морского бассейна способствовала усилению интенсивности осадения карбонатов и перемещению береговой линии, в результате чего сформировалась типичная, в основном мелководная, внутренняя карбонатная платформы, что согласуется с литологическим строением пачки Пиче.

Осадочная последовательность продолжается накоплением пелагических известняков, сформированных в процессе быстрой трансгрессии. Пелагические фации, богатые органическими веществами, были отложены в результате АОС-1б. Впоследствии карбонатная платформа расширяется и уступает место регрессии, что согласуется с условиями отложения формации Лижур.

### Выводы

Проведённые исследования показали, что осадочный разрез апт-альба характеризуется шестью литофациями и 14 микрофациями. Ископаемые известняки представлены ваккитом и пакстоуном двустворчатых моллюсков и устриц, иглокожие с бентовыми фораминиферами типичны для пачки Тибу. Пелагические известняки и структурные аргиллиты, с планктонными фораминиферами, остатками слоев аммонитов и доломитов слагают пачку Мачикес. Известняки, представленные аргиллитом с моллюсками и бентосными фораминиферами, ваккитом и пакстоуном, в которых доминируют моллюски, и пакстоун иглокожих, кортоидов и пеллоидов типичны для пачки Пиче.

Фации и связанные с ними условия седиментации указывают на то, что апт-альбские породы в бассейне Маракайбо отлагались на склоне карбонатной платформы. Визуально пористые типы фа-

ций ограничены осадками высокоэнергетической обстановки (например, скелетным пакстоуном), тогда как отложения фаций внутреннего и внешнего склонов обычно уплотнены.

Таким образом, проведённое автором изучение стратиграфического разреза показывает историю преобразования пород, которое включает три стадии: сингенетическую (например, селективное растворение, биоэрозия и/или микритизация); эогенетическую (растворение или осаждение минералов в растворе); мезогенетическую (например, уплотнение, взаимопроникновение зерен, стилолитизация, растворение, минеральное новообразование, обрастание кальцитового вещества по периферии фрагментов).

Пористость рассматриваемого комплекса пород в целом не превышает 5 %, за исключением некоторых доломитизированных интервалов. На основании петрографических критериев и стратиграфической приуроченности доломитовые интервалы являются результатом ранних и/или субповерхностных диагенетических процессов.

Проведённые автором литолого-петрографические исследования и анализ содержания органического углерода в породах обнажения карьера Цементос Кататумбо С.А. позволили выделить два стратиграфических интервала (пачка Мачикес и Пиче), обогащённых органическим веществом, что означает потенциальную возможность отнести их к нефтематеринским и нефтегенерирующим толщам. Формирование этих отложений было связано с этапами АОС-1а и АОС-1б, для которых были характерны восстановительные условия седиментации. Наличие в разрезе обнажения этих нефтепродуктивных отложений свидетельствует о широком площадном развитии формации Апон. Это, в свою очередь, существенно расширяет поисковые работы на нефть и газ в пределах континентальной равнины между озером Маракайбо и складчатой системой Анд, а также в северной акватории морского побережья Венесуэлы.

*Результаты, представленные в этой статье, являются частью научно-исследовательского проекта, который был проведен в сотрудничестве с исследователями проекта PGO Golfo de Venezuela. Автор выражает благодарность сотрудникам компании PDVSA Exploration and Reservoir Integrated Studies – Puerto La Cruz, PDVSA Exploration-Maraicao и PDVSA Geological Laboratory El Chaure – Puerto La Cruz за поддержку при работе над исследовательским проектом.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schlanger S.O., Jenkyns H.C. Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences // *Geologie en Mijnbouw*. – 1976. – V. 55. – P. 179–184. URL: [https://www.researchgate.net/publication/27710997\\_Cretaceous\\_Oceanic\\_Anoxic\\_Events\\_Causes\\_and\\_consequences](https://www.researchgate.net/publication/27710997_Cretaceous_Oceanic_Anoxic_Events_Causes_and_consequences) (дата обращения 09.10.2018).
2. Marine primary producer community during the mid-Cretaceous oceanic anoxic events (OAEs) 1a, 1b and 1d in the Vocontian Basin (SE France) evaluated from triaromatic steroids in sediments / Takuto Ando, Ken Sawada, Kazuki Okano, Reishi Takashima, Hi-

- roshi Nishi // *Organic Geochemistry*. – 2017. – V. 106. – P. 13–24. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146638017300335> (дата обращения 02.04.2018).
3. Stratigraphy, geochemistry, and paleoceanography of organic-carbon rich Cretaceous sequences / M.A. Arthur, H.C. Jenkyns, H.J. Brumsack, S.O. Schlanger // *Cretaceous Resources, Events and Rhythms* / Eds. R.N. Ginsburg, B. Beaudoin. – Dordrecht: Kluwer Academic, 1990. – V. 304. – P. 75–119. URL: [https://www.researchgate.net/publication/230889733\\_Stratigraphy\\_Geochemistry\\_and\\_Paleoceanography\\_of\\_Organic\\_Carbon-Rich\\_Cretaceous\\_Sequences](https://www.researchgate.net/publication/230889733_Stratigraphy_Geochemistry_and_Paleoceanography_of_Organic_Carbon-Rich_Cretaceous_Sequences) (дата обращения 13.03.2018).

4. Gaona-Narvaez T., Maurrasse F.J.M.R., Etayo-Serna F. Geochemistry, palaeoenvironments and timing of Aptian organic-rich beds of the Paja Formation (Curiti, Eastern Cordillera, Colombia). – London: Geological Society, 2013. – Special Publications. – V. 382. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/46952723.pdf> (дата обращения 02.04.2018).
5. Méndez J., Baquero M. Sedimentación del Grupo Cogollo. Facies, Reservorios, Porosidad y Niveles de Roca Madre. Sistema Petrolero. – Maracaibo: PDVSA Exploración, 2008. – 222 p.
6. Petroleum Distribution Characteristics of the Americas and the Exploration Prospect Analysis / Hao Qingqing, Li Lintao, Zuo Yinhui, Chen Weijun, Wu Lei, Yi Junjie // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. – 2018. – V. 92. – P. 378–393. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1755-6724.13512> (дата обращения 04.04.2018).
7. Hydrogeochemical characterization of oilfield waters from southeast Maracaibo Basin (Venezuela): Diagenetic effects on chemical and isotopic composition / T. Boschetti, B. Angulo, F. Cabrera, J. Vasquez, R. Montero // *Marine and Petroleum Geology*. – 2016. – V. 73. – P. 228–248. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264817216300435> (дата обращения 03.04.2018).
8. Liborius-Parada A., Slatt R.M. Geological Characterization of La Luna Formation as an Unconventional Resource in Lago De Maracaibo Basin, Venezuela // *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference*. – San Antonio, Texas, USA, 2016. – P. 1–20 URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/URTEC-2461968-MS> (дата обращения 05.04.2018).
9. The Cogollo Group and the oceanic anoxic events 1a and 1b, Maracaibo basin, Venezuela / J.A. Méndez, J. Méndez, D. Reyes, R. Whilchy // *Brazilian Journal of Geology*. – 2015. – V. 45. – P. 41–61. URL: [https://www.researchgate.net/publication/282743319\\_The\\_Cogollo\\_Group\\_and\\_the\\_oceanic\\_anoxic\\_events\\_1a\\_and\\_1b\\_Maracaibo\\_basin\\_Venezuela](https://www.researchgate.net/publication/282743319_The_Cogollo_Group_and_the_oceanic_anoxic_events_1a_and_1b_Maracaibo_basin_Venezuela) (дата обращения 05.04.2018).
10. Geología Sedimentaria de la Sucesión Barremiense-Cenomaniense, Grupo Cogollo-Basal La Luna, en la Región Central de la Cuenca de Maracaibo / Pinto J., Ortega S., Medina C., León L., Oropeza H., Rodríguez I. – Caracas: PDVSA-Intever, 2009. – 194 p.
11. Забанбарк А., Лобковский Л.И. Структурные черты и перспективы нефтегазоносности карибского региона // *Океанология*. – 2017. – Т. 57. – № 5. – С. 799–814. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30258158> (дата обращения 03.04.2018).
12. González C., Iturralde J., Picard X. Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas. – Caracas: Foninves, 1980. – V. 1. – 1001 p. URL: <https://es.scribd.com/doc/22828562/Geologia-de-Venezuela-y-sus-Cuencas-Petroliferas-Parte-1-Gonzalez-de-Juana> (дата обращения 21.02.2018).
13. Mann P., Escalona A., Castillo M. Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela // *AAPG Bulletin*. – 2006. – V. 90. – № 4. – P. 445–477. URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/90/4/445/132738/regional-geologic-and-tectonic-setting-of-the?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения 05.04.2012).
14. Stratigraphic synthesis of western Venezuela. Petroleum Basins of South America / F. Parnaud, Y. Gou, J.C. Pascual, M.A. Capello, I. Truskowski, H. Passalacqua // *AAPG Memoir: Petroleum Basins of South America*. – 1995. – V. 62. – P. 681–698. URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/1367/chapter/107170184/stratigraphic-synthesis-of-western-venezuela> (дата обращения 26.05.2018).
15. Perla Field: The Largest Discovery Ever in Latin America / V. Castillo, L. Benkovics, C. Cobos, D. Demuro, A. Franco // *AAPG Special Volumes. Memoir 113: Giant Fields of the decade 2000–2010*. – 2017. – P. 141–152. URL: [http://archives.datapages.com/data/specpubs/memoir113/data/141\\_aapg-sp2020141.htm](http://archives.datapages.com/data/specpubs/memoir113/data/141_aapg-sp2020141.htm) (дата обращения 03.04.2018).
16. Bartok P., Reijers T., Juhasz I. Lower Cretaceous Cogollo Group, Maracaibo Basin, Venezuela: sedimentology, diagenesis, and petrophysics // *AAPG Bulletin*. – 1981. – V. 65. – P. 1110–1134. URL: <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1980-81/data/pg/0065/0006/1100/1110.htm> (дата обращения 14.03.2018).
17. Four-phase tectonostratigraphic development of the southern Caribbean / A.N. Eva, K. Burke, P. Mann, G. y Wadge // *Marine and Petroleum Geology*. – 1989. – V. 6. – P. 9–21. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/026481728990072X> (дата обращения 05.04.2018).
18. Overview of the southeast Caribbean-South American plate boundary zone / M. Ostos, F. Yoris, H. Llallemant // *Special Paper of the Geological Society of America // Caribbean-South American plate interactions, Venezuela* / H.G. Avé Lallemant, V.B. Sisson. – 2005. – V. 394. – P. 53–89. URL: [https://www.researchgate.net/publication/283942470\\_Overview\\_of\\_the\\_southeast\\_Caribbean-South\\_American\\_plate\\_boundary\\_zone](https://www.researchgate.net/publication/283942470_Overview_of_the_southeast_Caribbean-South_American_plate_boundary_zone) (дата обращения 05.04.2018).
19. Rod E., Maync W. Revision of Lower Cretaceous stratigraphy of Venezuela // *AAPG Bulletin*. – 1954. – V. 38. – № 2. – P. 193–283. URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/38/2/193/33988/revision-of-lower-cretaceous-stratigraphy-of> (дата обращения 05.04.2018).
20. Renz O. Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela Occidental // *Boletín del Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Venezuela*. – 1958. – V. 5. – № 10. – P. 3–48.
21. Birth and death of the Late Cretaceous «La Luna Sea», and origin of the Tres Esquinas phosphorites / R.N. Erlich, O. Macsotay, A.J. Nederbragt, M.A. Lorente // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2000. – V. 13. – P. 21–45. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089598110000016X> (дата обращения 01.06.2018).
22. Martínez R.J.I., Hernandez R. Evolution and drowning of the Late Cretaceous Venezuelan carbonate platform // *Journal of South American Earth Sciences*. – 1992. – V. 5. – P. 197–210. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089598119290038Z> (дата обращения 01.06.2018).
23. Escalona A., Mann P. Sequence-stratigraphic analysis of Eocene clastic foreland basin deposits in central Lake Maracaibo using high-resolution well correlation and 3-D seismic data // *AAPG Bulletin*. – 2006. – V. 90. – P. 581–623. URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/90/4/581/132752/sequence-stratigraphic-analysis-of-eocene-clastic?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения 05.04.2018).
24. Flügel E. Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. Springer. – 2004. – 921 p. URL: <https://www.springer.com/us/book/9783662087268> (дата обращения 04.06.2018).
25. Burchette T.P., Wright P. Carbonate ramp depositional systems // *Sedimentary Geology*. – 1992. – V. 79. – P. 3–57. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003707389290003A> (дата обращения 02.07.2018).
26. Choquette P.W., Pray L.C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates // *AAPG Bulletin*. – 1970. – V. 54. – № 2. – P. 207–250. URL: <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1968-70/data/pg/0054/0002/0200/0207.htm?doi=10.1306%2F5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D> (дата обращения 02.07.2018).
27. Tucker M.E., Wright D. Carbonate sedimentology. – USA: Blackwell Science, 2004. – 482 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781444314175.fmatter> (дата обращения 02.07.2018).
28. Bartok P., Y Reijers T. Patronos depositacionales, diagénesis y evaluación de reservorios en el Grupo Cogollo, Cretáceo Inferior, Cuenca de Maracaibo. – Maracaibo: Maraven S.A. and Shell, 1979. – 28 p.
29. Bartok P., Reijers T., Juhasz I. Lower Cretaceous Cogollo Group, Maracaibo Basin, Venezuela: sedimentology, diagenesis, and pet-

- rophysics // AAPG Bulletin. – 1981. – V. 65 – P. 1110–1134. URL: <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1980–81/data/pg/0065/0006/1100/1110.htm> (дата обращения 14.03.2018).
30. Audemard F. Tectonics of western Venezuela. Ph.D. Thesis. – Houston, Texas, USA, 1992. – 245 p. URL: <https://scholarship.rice.edu/handle/1911/16556?show=full> (дата обращения 14.03.2018).
31. Aptian and Albian atmospheric CO<sub>2</sub> changes during oceanic anoxic events: evidence from fossil Ginkgo cuticles in Jilin Province, Northeast China / Y.W. Sun, X. Li, G. Zhao, H. Liu, Y. Zhang // Cretaceous Research. – 2016. – V. 62. – P. 130–141. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195667115301324> (дата обращения 02.04.2018).
32. Jenkyns H.C. Geochemistry of oceanic anoxic events // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2010. – V. 11. – № 3. – P. 1–30. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2009GC002788> (дата обращения 14.03.2018).
33. The Albian oceanic anoxic events record in central and northern Tunisia: Geochemical data and paleotectonic controls / K. Zina, A. Hassene, R. Adel, J. Jérémy // Marine and Petroleum Geology. – 2018. – V. 93. – P. 145–165. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264817218301168> (дата обращения 02.04.2018).
34. Peters K.E., Cassa M.R. Applied source rock geochemistry // AAPG Special Volumes. Memoir 60: The petroleum system – from source to trap / Eds. L.B. Magoon, W.G. Dow. – 1994. – P. 93–120. URL: <http://archives.datapages.com/data/spec-pubs/methodo2/data/a077/a077/0001/0050/0093.htm> (дата обращения 05.04.2018).
35. Renz O. The Cretaceous Ammonites of Venezuela. – Switzerland: Birkhäuser Verlag, 1982. – 132 p.
36. Méndez B.J. La Formación La Luna. Características de una cuenca anóxica en una plataforma de aguas someras // VII Congreso Geológico Venezolano. – 1989. – V. II. – P. 851–866.
37. Alberdi-Genolet M., Tocco R. Trace metals and organic geochemistry of the Machiques Member (Aptian-Albian) and La Luna Formation (Cenomanian-Campanian), Venezuela // Chemical Geology. – 1999. – V. 160. – P. 19–38. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254199000443> (дата обращения 05.04.2018).
38. Hunt J.M. Petroleum Geochemistry and Geology. 2<sup>nd</sup> ed. – New York, W.H. Freeman, 1995. – 743 p. URL: <http://www.primetgeo.com/petroleum-geochemistry-and-geology—john.pdf> (дата обращения 05.04.2018).
39. Peters K., Walters C., Moldowan J. The biomarker guide. Biomarkers and isotopes in the environmental and human history. 2<sup>nd</sup> ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – V. I. – 471 p.

Поступила 15.10.2018 г.

#### Информация об авторах

**Гарсия Бальса А.С.**, аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.763.1

## GEOLOGY OF THE APTIAN-ALBIAN COGOLLO GROUP CARBONATE PLATFORM AND IMPLICATIONS WITH THE OCEANIC ANOXIC EVENTS, MARACAIBO BASIN, NORTHWESTERN SOUTH AMERICA

**Aura S. García,**

garciaas@hw.tpu.ru

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

**The relevance** of the research is caused by the need of driving boost a detailed and updated re-exploration process that allows not only predicting with accuracy the behavior of currently producing fields, but also expanding new possibilities for localization and development of oilfields resource in the Maracaibo basin of western Venezuela. The Cogollo group, represented by the Apón, Lisure and Maraca formations, constitutes a very important interval since it contains the main carbonate deposits and source rocks of the Cretaceous in the west of Venezuela. The levels of source rock correspond to the oceanic anoxic events 1a and 1b. The first event corresponds to Machiques Member, and the second one is located near the top of the Piché Member, both belonging to the Apón formation. As these events generated source rocks with high hydrocarbon potential, this remains the major subject of interest and research.

**The main aim** of the research is to recognize facies of the deposit and the correlation with adjacent wells, for location of reservoir units and their possible association with potential intervals of source rock of the Lower Cretaceous in the territory of Maracaibo basin, Venezuela.

**The research objects** are outcrop sections of the quarry in Cementos Catatumbo C.A of Perijá Range, where the Lower Cogollo group carbonate succession and oil wells X-1, X-15, X-21, X-14 and X-23 are presented. Correlation analyses that include outcrops information at Perijá Range are insufficiently justified and need to be clarified.

**Research methods:** sedimentological analysis of the carbonate rocks of the Cogollo Group, through the analysis of a section of surface in the quarry of Cementos Catatumbo C.A of Zulia state, Venezuela, integrating sedimentary, biostratigraphic, total organic carbon and Gamma-Ray data.

**Results.** The author has identified 14 microfacies associated with a scenario of a carbonate ramp basin. In the succession of rocks of the Apón Formation a maximum flooding surface and a drowning unconformity are distinguished. An approximated and estimated correlation taking into account stratigraphy, lithofacies and the GR responses was carried out with the outcrop section of quarry in Cementos Catatumbo C.A and oil wells X-1, X-15, X-21, X-14 and X-23.

### Key words:

Carbonate platform, Cogollo group, Apón formation, Maracaibo basin, OAE 1a, OAE 1b.

The results introduced in the paper are the part of research project in collaboration with the researches of the project PGO Golfo de Venezuela. The author appreciates the support of the members of the company PDVSA Exploration and Reservoir Integrated Studies – Puerto La Cruz, PDVSA Exploration-Maracaibo and PDVSA Geological Laboratory El Chaure – Puerto La Cruz when working at the research.

### REFERENCES

- Schlanger S.O., Jenkyns H.C. Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*, 1976, vol. 55, pp. 179–184. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/27710997\\_Cretaceous\\_Oceanic\\_Anoxic\\_Events\\_Causes\\_and\\_consequences](https://www.researchgate.net/publication/27710997_Cretaceous_Oceanic_Anoxic_Events_Causes_and_consequences) (accessed 09 October 2018).
- Takuto Ando, Ken Sawada, Kazuki Okano, Reishi Takashima, Hiroshi Nishi. Marine primary producer community during the mid-Cretaceous oceanic anoxic events (OAEs) 1a, 1b and 1d in the Vocontian Basin (SE France) evaluated from triaromatic steroids in sediments. *Organic Geochemistry*, 2017, vol. 106, pp. 13–24. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146638017300335> (accessed 2 April 2018).
- Arthur M.A., Jenkyns H.C., Brumsack H.J., Schlanger S.O. Stratigraphy, geochemistry, and paleoceanography of organic-carbon rich Cretaceous sequences. *Cretaceous Resources, Events and Rhythms*. Eds. R.N. Ginsburg, B. Beaudoin. Dordrecht, Kluwer Academic, 1990. Vol. 304, pp. 75–119. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/230889733\\_Stratigraphy\\_Geochemistry\\_and\\_Paleoceanography\\_of\\_Organic\\_Carbon-Rich\\_Cretaceous\\_Sequences](https://www.researchgate.net/publication/230889733_Stratigraphy_Geochemistry_and_Paleoceanography_of_Organic_Carbon-Rich_Cretaceous_Sequences) (accessed 3 March 2018).
- Gaona-Narvaez T., Maurrasse F.J.M.R., Etayo-Serna F. Geochemistry, palaeoenvironments and timing of Aptian organic-rich beds of the Paja Formation (Curiti, Eastern Cordillera, Colombia). *Geological Society*. London, Special Publications, 2013. Vol. 382, pp. 31–48. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/46952723.pdf> (accessed 2 April 2018).
- Méndez J., Baquero M. *Sedimentación del Grupo Cogollo. Facies, Reservorios, Porosidad y Niveles de Roca Madre. Sistema Petrolero* [Sedimentation of the Cogollo Group. Facies, reservoirs, porosity and source rock levels. Oil System]. Maracaibo, PDVSA Exploración, 2008. 222 p. In Spanish.
- Hao Qingqing, Li Lintao, Zuo Yinhui, Chen Weijun, Wu Lei, Yi Junjie. Petroleum Distribution Characteristics of the Americas and the Exploration Prospect Analysis. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 2018, vol. 92, pp. 378–393. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1755-6724.13512> (accessed 4 April 2018).
- Boschetti T., Angulo B., Cabrera F., Vasquez J., Montero R. Hydrogeochemical characterization of oilfield waters from southeast Maracaibo Basin (Venezuela): Diagenetic effects on chemical and isotopic composition. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, vol. 73, pp. 228–248. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264817216300435> (accessed 3 April 2018).
- Liborius-Parada A., Slatt R.M. Geological Characterization of La Luna Formation as an Unconventional Resource in Lago De Maracaibo Basin, Venezuela. *Geological Characterization of La Luna*



- Formation as an Unconventional Resource in Lago De Maracaibo Basin, Venezuela. SPE/AAPG/SEG *Unconventional Resources Technology Conference*. San Antonio, Texas, USA, 2016. pp. 1–20. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/URTEC-2461968-MS> (accessed 5 April 2018).
9. Méndez J.A., Méndez J., Reyes D., Whilchy R. The Cogollo Group and the oceanic anoxic events 1a and 1b, Maracaibo basin, Venezuela. *Brazilian Journal of Geology*, 2015, vol. 45, pp. 41–61. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/282743319\\_The\\_Cogollo\\_Group\\_and\\_the\\_oceanic\\_anoxic\\_events\\_1a\\_and\\_1b\\_Maracaibo\\_basin\\_Venezuela](https://www.researchgate.net/publication/282743319_The_Cogollo_Group_and_the_oceanic_anoxic_events_1a_and_1b_Maracaibo_basin_Venezuela) (accessed 5 April 2018).
  10. Pinto J., Ortega S., Medina C., León L., Oropeza H., Rodríguez I. *Geología Sedimentaria de la Sucesión Barremiense-Cenomanense, Grupo Cogollo-Basal La Luna, en la Región Central de la Cuenca de Maracaibo* [Sedimentary Geology of the Barremian-Cenomanian succession, Cogollo Group-Basal La Luna, in the Central Region of the Maracaibo Basin]. Caracas, PDVSA-Intevep, 2009. 194 p. In Spanish.
  11. Zabanbark A., Lobkovsky L.I. Structural features and oil-and-gas bearing of the Caribbean. *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 5, pp. 799–814. In Rus. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30258158> (accessed 3 April 2018).
  12. González C., Iturralde J., Picard X. *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*. Caracas, Foninves, 1980. Vol. 1, 1001 p. Available at: <https://es.scribd.com/doc/22828562/Geologia-de-Venezuela-y-sus-Cuencas-Petroliferas-Parte-1-Gonzalez-de-Juana> (21 February 2018).
  13. Mann P., Escalona A., Castillo M. Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela. *AAPG Bulletin*, 2006, vol. 90, no. 4, pp. 445–477. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/90/4/445/132738/regional-geologic-and-tectonic-setting-of-the?redirectedFrom=fulltext> (accessed 5 April 2018).
  14. Parnaud F., Gou Y., Pascual J.C., Capello M.A., Truskowski I., Passalacqua H. Stratigraphic synthesis of western Venezuela. *Petroleum Basins of South America. AAPG Memoir: Petroleum Basins of South America*, 1995, vol. 62, pp. 681–698. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/1367/chapter/107170184/stratigraphic-synthesis-of-western-venezuela> (accessed 26 May 2018).
  15. Castillo V., Benkovics L., Cobos C., Demuro D., Franco A. Perla Field: The Largest Discovery Ever in Latin America. *AAPG Special Volumes. Memoir 113: Giant Fields of the decade 2000–2010*, 2017, pp. 141–152. Available at: [http://archives.datapages.com/data/specpubs/memoir113/data/141\\_aapg-sp2020141.htm](http://archives.datapages.com/data/specpubs/memoir113/data/141_aapg-sp2020141.htm) (accessed 3 April 2018).
  16. Bartok P., Reijers T., Juhasz I. Lower Cretaceous Cogollo Group, Maracaibo Basin, Venezuela: sedimentology, diagenesis, and petrophysics. *AAPG Bulletin*, 1981, vol. 65, pp. 1110–1134. Available at: <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1980–81/data/pg/0065/0006/1100/1110.htm> (accessed 14 March 2018).
  17. Eva A.N., Burke K., Mann P., Y Wadge G. Four-phase tectono-stratigraphic development of the southern Caribbean. *Marine and Petroleum Geology*, 1989, vol. 6, pp. 9–21. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/026481728990072X> (accessed 5 April 2018).
  18. Ostos M., Yoris F., Llallemant H. Overview of the southeast Caribbean-South American plate boundary zone. Special Paper of the Geological Society of America. *Caribbean-South American plate interactions, Venezuela*. Eds. H.G. Avé Lallemant, V.B. Sisson, 2005, vol. 394, pp. 53–89. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/283942470\\_Overview\\_of\\_the\\_southeast\\_Caribbean-South\\_American\\_plate\\_boundary\\_zone](https://www.researchgate.net/publication/283942470_Overview_of_the_southeast_Caribbean-South_American_plate_boundary_zone) (accessed 5 April 2018).
  19. Rod E., Mayne W. Revision of Lower Cretaceous stratigraphy of Venezuela. *AAPG Bulletin*, 1954, vol. 38, no. 2 pp. 193–283. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/38/2/193/33988/revision-of-lower-cretaceous-stratigraphy-of> (accessed 5 April 2018).
  20. Renz O. Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela Occidental [Cretaceous stratigraphy in Western Venezuela]. *Boletín del Ministerio de Minas e Hidrocarburos*, 1958, vol. 5, no. 10, pp. 3–48. In Spanish.
  21. Erlich R.N., Macsotay O., Nederbragt A.J., Lorente M.A. Birth and death of the Late Cretaceous «La Luna Sea», and origin of the Tres Esquinas phosphorites. *Journal of South American Earth Sciences*, 2000, vol. 13, pp. 21–45. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089598110000016X> (accessed 1 June 2018).
  22. Martínez R.J.I., Hernández R. Evolution and drowning of the Late Cretaceous Venezuelan carbonate platform. *Journal of South American Earth Sciences*, 1992, vol. 5, pp. 197–210. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089598119290038Z> (accessed 1 June 2018).
  23. Escalona A., Mann P. Sequence-stratigraphic analysis of Eocene clastic foreland basin deposits in central Lake Maracaibo using high-resolution well correlation and 3-D seismic data. *AAPG Bulletin*, 2006, vol. 90, pp. 581–623. Available at: <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/90/4/581/132752/sequence-stratigraphic-analysis-of-eocene-clastic?redirectedFrom=fulltext> (accessed 5 April 2018).
  24. Flügel E. *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*. Springer, 2004. 921 p. Available at: <https://www.springer.com/us/book/9783662087268> (accessed 4 June 2018).
  25. Burchette T.P., Wright P. Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary Geology*, 1992, vol. 79, pp. 3–57. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003707389290003A> (accessed 2 July 2018).
  26. Choquette P.W., Pray L.C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, 1970, vol. 54, no. 2, pp. 207–250. Available at: <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1968–70/data/pg/0054/0002/0200/0207.htm?doi=10.1306%2F5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D> (accessed 2 July 2018).
  27. Tucker M.E., Wright D. *Carbonate sedimentology*. USA, Blackwell Science, 2004, 482 p. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781444314175.fmatter> (accessed 2 July 2018).
  28. Bartok P., Y Reijers T. *Patrones depositacionales, diagénesis y evaluación de reservorios en el Grupo Cogollo, Cretáceo Inferior, Cuenca de Maracaibo* [Depositional patterns, diagenesis and reservoir evaluation in the Cogollo Group, Lower Cretaceous, Maracaibo Basin]. Maracaibo, Maraven S.A. and Shell, 1979. 28 p. In Spanish.
  29. Bartok P., Reijers T., Juhasz I. Lower Cretaceous Cogollo Group, Maracaibo Basin, Venezuela: sedimentology, diagenesis, and petrophysics. *AAPG Bulletin*, 1981, vol. 65, pp. 1110–1134. Available at: <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1980–81/data/pg/0065/0006/1100/1110.htm> (accessed 14 March 2012).
  30. Audemard F. *Tectonics of western Venezuela*. Ph.D. Thesis. Houston, Texas, USA, 1992. 245 p. Available at: <https://scholarship.rice.edu/handle/1911/16556?show=full> (accessed 14 March 2018).
  31. Sun Y.W., Li X., Zhao G., Liu H., Zhang Y. Aptian and Albian atmospheric CO<sub>2</sub> changes during oceanic anoxic events: Evidence from fossil Ginkgo cuticles in Jilin Province, Northeast China. *Cretaceous Research*, 2016, vol. 62, pp. 130–141. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195667115301324> (accessed 2 April 2018).
  32. Jenkyns H.C. Geochemistry of oceanic anoxic events. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, vol. 11, no. 3, pp. 1–30. Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/2009GC002788> (accessed 14 March 2018).

33. Zina K., Hassene A., Adel R., Jérémy J. The Albian oceanic anoxic events record in central and northern Tunisia: Geochemical data and paleotectonic controls. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 93, pp. 145–165. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264817218301168> (accessed 2 April 2018).
34. Peters K.E., Cassa M.R. Applied source rock geochemistry. *AAPG Special Volumes*. Memoir 60: The petroleum system – From source to trap, 1994, pp. 93–120. Available at: <http://archives.data-pages.com/data/specpubs/methodo2/data/a077/a077/0001/0050/0093.htm> (accessed 5 April 2018).
35. Renz O. *The Cretaceous Ammonites of Venezuela*. Switzerland, Birkhäuser Verlag, 1982. 132 p.
36. Méndez B.J. La Formación La Luna. Características de una cuenca anóxica en una plataforma de aguas someras [La Luna Formation. Characteristics of an anoxic basin in a shallow water platform]. *VII Congreso Geológico Venezolano*, 1989, vol. II, pp. 851–866. In Spanish.
37. Alberdi-Genolet M., Tocco R. Trace metals and organic geochemistry of the Machiques Member (Aptian-Albian) and La Luna Formation (Cenomanian-Campanian), Venezuela. *Chemical Geology*, 1999, vol. 160, pp. 19–38. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254199000443> (accessed 5 April 2018).
38. Hunt J.M. *Petroleum Geochemistry and Geology*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, W.H. Freeman, 1995. 743 p. Available at: <http://www.petrageous.com/petroleum-geochemistry-and-geology-john.pdf> (accessed 5 April 2018).
39. Peters K., Walters C., Moldowan J. *The biomarker guide. Biomarkers and isotopes in the environmental and human history*. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. Vol. I, 471 p.

Received: 15 October 2018.

#### Information about the authors

**Aura S. García**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.57, 552.52

## МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ТОНШТЕЙНОВ В УГЛЯХ БЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИНУСИНСКОГО БАСЕЙНА

Вергунов Алексей Викторович<sup>1</sup>,  
alexeivergunov@rambler.ru

Арбузов Сергей Иванович<sup>1</sup>,  
siarbuzov@mail.ru

Соболенко Виктор Михайлович<sup>2</sup>,  
v.sobolenko@arshanovskiy.ru

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

<sup>2</sup> ОАО «Разрез Аршановский»,  
Россия, 655016, г. Абакан, ул. Лермонтова, 20.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью оценки влияния вулканогенного пирокластического материала на формирование геохимического фона редких элементов в угле.

**Цель:** изучить минералого-геохимические особенности тонштейнов и вмещающих углей черноморской свиты Бейского месторождения Минусинского бассейна.

**Объекты:** тонштейны и вмещающие угли черноморской свиты Бейского месторождения Минусинского угольного бассейна.

**Методы:** опробование угольных пластов черноморской свиты Бейского месторождения выделяются две разновидности: 1. тонштейны каолинитового (70–100 %) состава, 2. тонштейны смешанного состава. Единичные каолинитовые прослои характеризуются содержанием  $P_2O_5$  до 20 %. Комплексный минералого-геохимический подход позволил определить состав исходного пеплового материала, послужившего источником для формирования тонштейнов. Среди изученных прослоев преобладают тонштейны, образованные из кислой вулканогенной пирокластики, менее распространены тонштейны, образовавшиеся из вулканического пепла среднего состава. Редко встречаются тонштейны, сформированные при участии вулканогенного пирокластического материала основного и щелочно-основного составов. Исследования показали существенный вклад вулканогенного пирокластического материала в накопление РЗЭ, Zr, Hf, Ta, Nb, Y, Th и U в углях черноморской свиты Бейского месторождения. Рассмотрен вопрос о возможных источниках пеплового материала, из которого сформировались тонштейны.

**Результаты.** Рассмотрены минералого-геохимические особенности тонштейнов черноморской свиты Бейского месторождения Минусинского угольного бассейна. Среди тонштейнов Бейского месторождения выделяются две разновидности: 1. тонштейны каолинитового (70–100 %) состава, 2. тонштейны смешанного состава. Единичные каолинитовые прослои характеризуются содержанием  $P_2O_5$  до 20 %. Комплексный минералого-геохимический подход позволил определить состав исходного пеплового материала, послужившего источником для формирования тонштейнов. Среди изученных прослоев преобладают тонштейны, образованные из кислой вулканогенной пирокластики, менее распространены тонштейны, образовавшиеся из вулканического пепла среднего состава. Редко встречаются тонштейны, сформированные при участии вулканогенного пирокластического материала основного и щелочно-основного составов. Исследования показали существенный вклад вулканогенного пирокластического материала в накопление РЗЭ, Zr, Hf, Ta, Nb, Y, Th и U в углях черноморской свиты Бейского месторождения. Рассмотрен вопрос о возможных источниках пеплового материала, из которого сформировались тонштейны.

### Ключевые слова:

Уголь, тонштейны, геохимия, вулканогенная пирокластика, вулканический пепел.

### Введение

Одним из основных факторов, контролирующих накопление редких элементов в углях, является фактор синхронного вулканизма [1]. Лишь в последнем десятилетии XX в. ученые по достоинству оценили глобальную роль вулканизма в формировании геохимического фона углей [2].

Участию вулканогенной пирокластики в формировании угленосных отложений Сибирского региона особое внимание уделял А.В. Ван [3, 4]. На примере Кузнецкого, Минусинского и Тунгусского бассейнов он показал тотальное значение вулканизма в формировании угленосных отложений [3]. Впервые присутствие вулканогенного пепла в углях Минусинского бассейна отмечено в работе В.М. Богомазова в 1961 г. [5].

Томские ученые обосновали связь аномальных концентраций РЗЭ, Zr, Y, Nb, Hf, Ta, Th в углях Минусинского бассейна с вулканогенным пирокластическим материалом [6].

Пирокластический материал в угле изменен и в большинстве случаев представлен в виде специфических прослоев, получивших в мировой геологической литературе название тонштейны. Они имеют преимущественно каолинитовый состав, большую протяженность и используются для корреляции угольных пластов в границах месторождений и бассейнов, а также для выяснения периодичности и состава продуктов вулканической деятельности [7]. И.Б. Волкова впервые для Минусинского угольного бассейна описала тонштейны, предположив их водно-осадочный генезис. Л.А. Адмакин изучил серию каолинитовых прослоев во вскрытых на тот момент угольных пластах (Гигант, Мощный, Великан) черноморской свиты. На основе исследования структурных и вещественных особенностей тонштейнов была проведена их типизация, рассмотрен гипотетический источник материала, а также предложены механизмы их накопления и стадийность преобразования [8].

В последнее десятилетие коллективом исследователей Томского политехнического университета была проделана работа по комплексному исследованию особенностей минерального и химического состава тонштейнов черногорской свиты Минусинского бассейна с целью выделения специфических по составу вулканогенных пепловых прослоев [9].

В основу данной работы положены как новые данные, так и обобщённые материалы, накопленные ранее. Целью исследования стало изучение минералого-геохимических особенностей тон-

штейнов и вмещающих их углей черногорской свиты Бейского месторождения Минусинского бассейна.

#### Геологическая характеристика района исследований

Минусинский угольный бассейн располагается на юге Центрально-Сибирского региона. В геологическом плане он приурочен к одноименному прогибу, представляющему синклиналичную структуру, вытянутую субмеридионально почти на 300 км и ограниченную с запада, востока и юга структурами

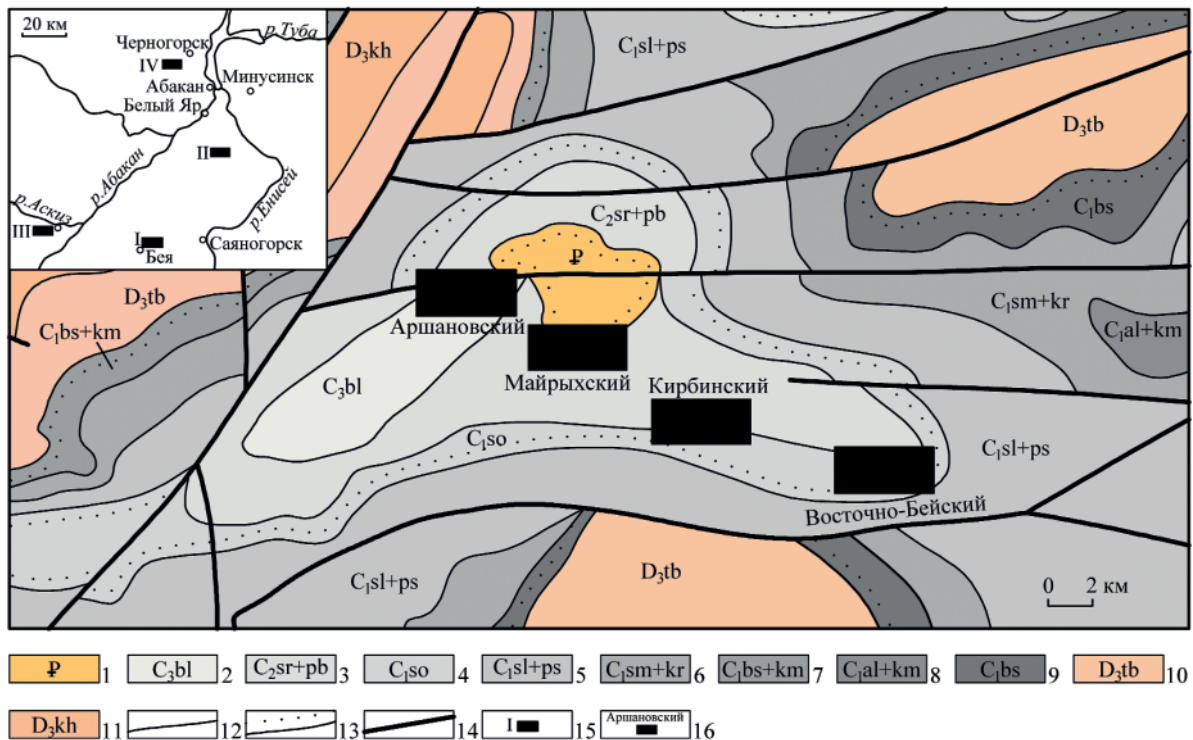


Рис. 1. Геологическая карта Бейского месторождения по [11]: 1 – палеогеновые образования; 2–9 – карбон: 2 – белоярская свита – алевролиты, аргиллиты, песчаники, пласты угля каменного (до 570 м), 3 – сарская, черногорская и побережная свиты объединенные – алевролиты, аргиллиты, песчаники, конгломераты, пласты угля каменного (до 720 м), 4 – серпуховский ярус (?). Соленозерская свита – песчаники, алевролиты, гравелиты, конгломераты (до 115 м), 5 – соломенская, ямкинская, байновская и подсинская свиты объединенные – туффиты, туфы, известняки, туфоалевролиты, туфопесчаники, конгломераты (до 700 м), 6 – самохвальская и кривинская свиты объединенные – туфы, туффиты, известняки, туфопесчаники, туфоалевролиты, конгломераты (до 380 м), 7 – быстринская, алтайская и камыштинская свиты объединенные – туфы, туффиты, алевролиты, известняки, песчаники, конгломераты (до 470 м), 8 – алтайская и камыштинская свиты объединенные – алевролиты и известняки, туфы, туффиты, песчаники, гравелиты, конгломераты (до 250 м), 9 – быстринская свита – туфы, туффиты, песчаники, известняки (до 220 м); 10–11 – девон: 10 – фаменский ярус. Тубинская свита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, конгломераты, мергели (до 200–1300 м), 11 – франский ярус. Кохайская свита – алевролиты, песчаники, аргиллиты, мергели, туффиты (до 550 м); 12–13 – геологические границы: 12 – согласное залегание, 13 – несогласное залегание; 14 – разрывные нарушения; 15 – месторождения: I – Бейское, II – Изыхское, III – Аскизское, IV – Черногорское; 16 – разрезы, ведущие добычу угля на территории Бейского месторождения

Fig. 1. Geological map of the Beysk deposit by [11]: 1 – paleogene deposits; 2–9 – carbon: 2 – beloyarsk suite – siltstone, mudstone, sandstone, coal seams (up to 570 m), 3 – sarskaya, chernogorskaya and poberezhnaya combined suites – siltstone, mudstone, sandstone, conglomerate, coal seams (up to 720 m), 4 – serpuhovskiy epoch (?). Solenozerskaya suite – sandstone, siltstone, gravelite, conglomerate (up to 115 m), 5 – solomenskaya, yamkinskaya, baynovskaya and podsinskaya combined suites – tuffite, tuff, limestone, tuffsiltstone, tuffsandstone, conglomerate (up to 700 m), 6 – samokhvalskaya and krivinskaya combined suites – tuff, tuffite, limestone, tuffsandstone, tuffsiltstone, conglomerate (up to 380 m), 7 – bystryanskaya, altayskaya and kamyshinskaya combined suites – tuff, tuffite, siltstone, limestone, conglomerate (up to 470 m), 8 – altayskaya and kamyshinskaya combined suites – siltstone and limestone, tuff, tuffite, sandstone, gravelite, conglomerate (up to 250 m), 9 – bystryanskaya suite – tuff, tuffite, sandstone, limestone (up to 220 m); 10–11 – Devon: 10 – famenskiy epoch. Tubinskaya suite – sandstone, siltstone, mudstone, limestone, conglomerate, marl (up to 200–1300 m), 11 – franskiy epoch. Kokhayskaya suite – siltstone, sandstone, mudstone, marl, tuffite (up to 550 m); 12–13 – contact lines: 12 – regular bedding, 13 – irregular bedding; 14 – faults; 15 – deposits: I – Beysk, II – Izykh, III – Askiz, IV – Chernogorsk; 16 – coal mines in the Beysk deposit





### Методика исследований

Материалом для исследования послужили пробы тонштейнов и вмещающих их углей черногогорской свиты Бейского месторождения Минусинского бассейна. Всего изучено 42 тонштейна мощностью от 0,2 до 10 см. Длина интервалов опробования изменялась от 1 до 5 см в зависимости от мощности опробованного тонштейна. Отдельные тонштейны опробованы в нескольких сечениях с целью проследить латеральную изменчивость минерального и химического состава.

Диагностика минерального состава тонштейнов проведена с помощью порошкового дифрактометра D2 PHASER. Изучение тонштейнов в шлифах позволило определить их структурно-текстурные особенности и наличие процессов замещения одних минералов другими. Формы, морфологические особенности и состав тонкодисперсных минеральных образований были изучены с использованием сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-3400N с энергодисперсионной приставкой Bruker для определения элементного состава.

Элементный состав отобранных проб тонштейнов и вмещающих углей изучался с помощью методов инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в ядерно-геохимической лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра (МИНОЦ) «Урановая геология» на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т НИ ТПУ (аналитик А.Ф. Судыко). А также спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток (аналитик – Н.В. Зарубина) и в химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск (аналитик Н.В. Федюнина). Анализ состава петрогенных элементов тонштейнов и золы угля выполнен методом рентгеновской флуоресценции в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, г. Новосибирск (аналитик Н.Г. Карманова). Все лаборатории аккредитованы в системе аккредитации аналитических лабораторий Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

В табл. 1 показана сравнительная оценка результатов элементного анализа, полученного методом ICP MS, с результатами анализа методом INAA. Сходимость результатов удовлетворительная.

Таблица 1. Сравнение результатов определения содержания химических элементов методами ICP MS и INAA, ppm

Table 1. Comparison of the results of determination of chemical elements by ICP MS and INAA, ppm

Элементы Elements	Ap-37-17		Ap-4-17		Ap-29-17	
	ICP MS	INAA	ICP MS	INAA	ICP MS	INAA
Sc	8,2	9,5	13,6	14,3	10,6	9,7
Cr	20,7	16,0	8,1	20,6	4,1	8,7
Co	1,5	0,6	2,9	3,2	60,8	62,5
Zn	120,9	93,9	111	82,2	5,3	<2
Rb	2,3	1,0	2,9	<2	0,32	<3
Sr	2450	2311	4436	3739	775	603
Cs	0,22	0,10	0,14	<0,2	0,01	<0,2
Ba	419	540	1175	1228	256	226
La	102	147	97,0	121	34,1	34,6
Ce	209	255	208	224	44,6	45,0
Nd	88,1	90,9	89,2	81,8	16,7	<2
Sm	18,0	23,7	18,0	17,5	2,6	4,6
Eu	3,0	4,9	2,2	3,5	0,65	0,87
Tb	1,9	3,0	2,3	3,5	0,52	0,51
Yb	1,1	1,3	3,8	3,9	1,3	1,5
Lu	0,11	0,11	0,47	0,54	0,19	0,18
Hf	4,5	5,1	3,4	4,2	1,5	1,6
Ta	2,6	4,5	1,3	0,86	0,05	0,01
Th	101	117	87,0	74,9	1,0	1,3
U	10,7	10,0	18,2	14,6	2,4	2,8

### Результаты исследований

#### Минеральный состав и структура

Изучение минерального состава тонштейнов Бейского месторождения показало, что каолинит является основным породообразующим минералом. Согласно ранее проведенным исследованиям по изучению преобразования вулканогенной пирок-

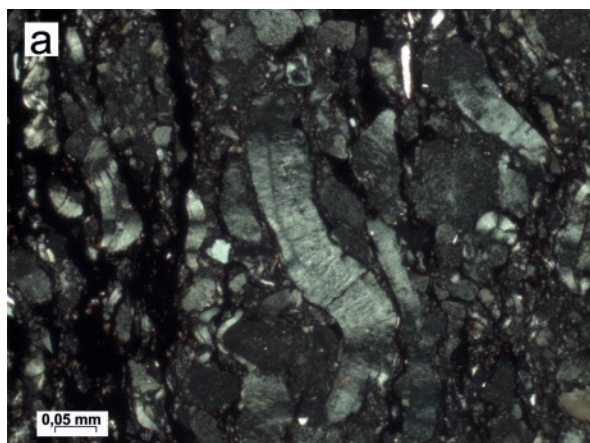
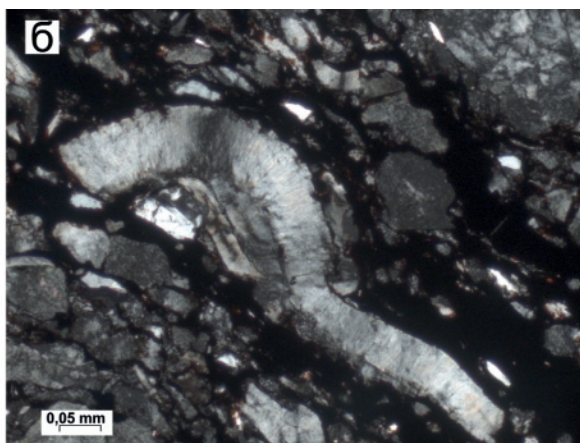


Рис. 3. Изогнутые агрегаты каолинита (вермикулы)

Fig. 3. Curved kaolinite aggregates (vermicula)



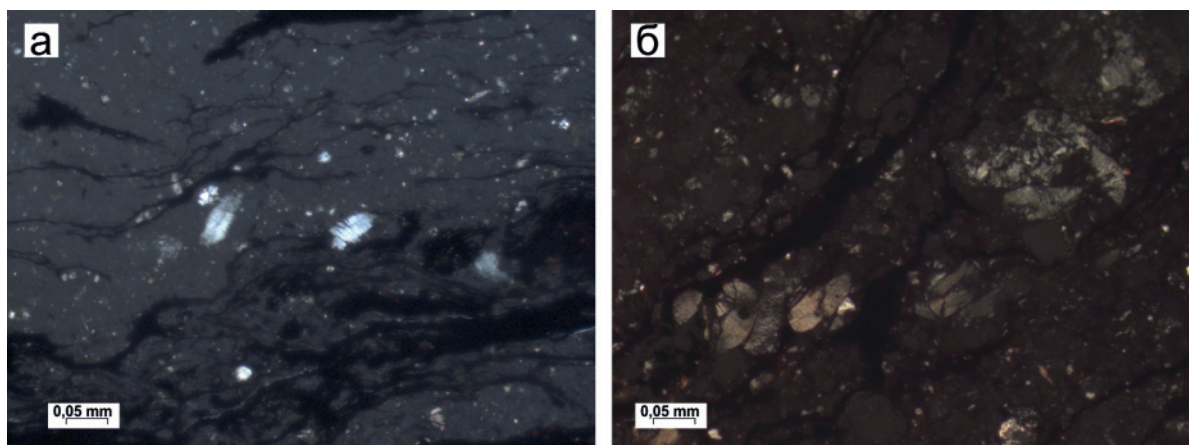


Рис. 4. Криптокристаллический (а) и крупчатый (б) тонштейны Бейского месторождения

Fig. 4. Cryptocrystalline (a) and granular (b) tonsteins of the Beysk deposit

кластики, каолинит образуется главным образом в процессе преобразования вулканического стекла и, в меньшей степени, полевых шпатов, амфиболов и пироксенов [12]. Характерной особенностью каолинита вулканокластических тонштейнов, отличающей их от породных каолиновых прослоев терригенной природы, является распространение в них хорошо образованных кристаллов (рис. 3). Хотя в составе тонштейнов широко распространена и тонкодисперсная разновидность каолинита, образующая так называемые криптокристаллические тонштейны (рис. 4, а) [8]. Среди тонштейнов Бейского месторождения диагностированы также крупчатые тонштейны, представленные неправильными комочками скрыто- и микрокристаллического каолинита (рис. 4, б).

Согласно рентгенофазовому анализу среди тонштейнов выделяются разновидности, обогащенные каолинитом (70–100 %), а также прослой смешанного состава (табл. 2).

К второстепенным минералам в составе тонштейнов относятся: кварц, кристобалит, тридимит, полевые шпаты, фторапатит, гойяцит, плюмбогуммит и отдельные акцессорные минералы (циркон, монацит, ксенотим и др.). Основными эпигенетическими минералами являются: сидерит, доломит, образовавшиеся в уже сформированных каолиновых прослоях. Такой минеральный состав в целом типичен для тонштейнов разных регионов мира [13–15].

#### Химический состав

В табл. 3 приведен химический состав тонштейнов Бейского месторождения. Как видно из результатов анализов, содержание кремнезема в тонштейнах колеблется в широких пределах – от 12,78 до 56,88 %. Содержание глинозема также изменяется в широком диапазоне (7,84–44,40 %). По данным показателям изученные тонштейны можно разделить на две группы. В первую группу входят тонштейны, близкие по составу к каолиниту, что выражается в обогащении кремнеземом (49,69–56,88 %) и глиноземом (39,59–44,40 %). Вторая группа

включает в себя тонштейны с малым содержанием  $\text{SiO}_2$  (12,78–42,31 %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (7,84–39,33 %). Эти тонштейны обычно обогащены Ca, Mg и Fe либо, в более редких случаях, фосфором.

Таблица 2. Минеральный состав тонштейнов Бейского месторождения

Table 2. Mineral composition of tonsteins of the Beysk deposit

Минерал Образец Mineral/Sample	Ap-37-17	Ap-39-17	Ap-12-17	Ap-14-17	Ap-17-17	Ap-18-17	Ap-8-15	Ap-62-14	Ap-68-14	Ap-4-17
Каолинит Kaolinite	90,4	88,5	89,4	85,5	86,7	80,8	69,5	33,0	64,6	72,6
Галлуазит Halloysite	3,1	2,6	–	–	–	–	7,3	–	–	–
Кварц Quartz	1,5	3,2	3,6	3,2	1,5	1,2	8,9	–	6,4	1,4
Кристобалит Cristobalite	–	–	1,4	1,5	2,0	2,6	8,9	–	–	2,2
Тридимит Tridymite	3,6	4,5	1,0	1,6	4,4	5,2	–	–	–	3,3
Мусковит Muscovite	–	–	1,5	1,0	1,4	2,1	–	–	–	1,1
Пирит Pyrite	–	–	–	1,0	–	1,0	–	–	–	–
Сидерит Siderite	–	–	–	–	–	–	–	–	1,5	13,5
Содалит Sodalite	–	–	–	1,0	1,0	1,7	–	–	–	–
Фторапатит Fluorapatite	–	–	–	–	–	–	–	16,3	–	–
Гояцит Goyazite	–	–	–	–	–	–	–	45,7	27,5	3,1
Плюмбогуммит Plumbogummite	1,4	1,2	–	–	–	–	–	–	–	–
Доломит Dolomite	–	–	–	–	–	–	1,1	–	–	–
Ларнит Larnite	–	–	–	–	–	–	–	3,9	–	–
Плагиоклаз Plagioclase	–	–	–	1,0	–	–	–	–	–	–
КФШ K-feldspar	–	–	3,1	4,2	3,0	5,4	4,3	–	–	2,8
Ксонолит Xonotlite	–	–	–	–	–	–	–	1,1	–	–
Сумма Sum, %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100



Отношение  $\text{SiO}_2$  к  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (алюмокремниевый модуль, АМ) для каолинита составляет 1,18. В исследуемых пробах это соотношение изменяется от 0,701 до 1,867. Пробы тонштейнов, которые отличаются низкой величиной АМ, во всех исследованных случаях характеризуются высоким содержанием  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,94–16,99 %).

В основополагающей работе по обоснованию природы тонштейнов и их аналогов в углях Д.А. Спирс показал потерю  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  при преобразовании вулканического пепла в тонштейн на основе анализа включений вулканического стекла в кварце из одного и того же тонштейна. Потеря этих элементов увеличивает концентрацию Al в 2,95 раза. Также исследование показало, что в процессе преобразования  $\text{TiO}_2$  не только не подвижен, но и сопоставим с первоначальной концентрацией в вулканическом пепле [16].

Значение титанового модуля ( $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , ТМ) позволяет оценить первичный состав вулканоген-

ной пирокластики, сформировавшей тонштейны. Исследования Д.А. Спирса и Р. Канариса-Сотириу показывают, что величина ТМ <0,02 характерна для риолитовой пирокластики, >0,06 – для основной. Промежуточные значения ТМ свидетельствуют о присутствии пирокластики среднего или щелочного состава [13].

Большинство исследованных тонштейнов Бейского месторождения характеризуются низким значением ТМ в диапазоне от 0,005 до 0,018, что соответствует пирокластике кислого состава. Остальные пробы, согласно ТМ (0,027–0,048), образовались из пеплов среднего или щелочного составов. Проба Ар-25–17 отличается высоким  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  отношением (0,077), свидетельствующим об основном составе пеплового материала.

В 1989 г. С. Кроули указал на то, что выщелачивание вулканического пепла вызвало увеличение содержания ряда элементов в угольных про-  
слоях, находящихся над и под тонштейном [17].

Таблица 3. Химический состав тонштейнов Бейского месторождения, вес. %

Table 3. Chemical composition of the tonsteins of Beysk deposit, wt. %

Компоненты Components	Ар-37-17	Ар-39-17	Ар-12-17	Ар-14-17	Ар-17-17	Ар-18-17	Ар-4-19-15	Ар-9-19-15	Ар-11-19-15	Ар-8-15	Ар-10-15	Ар-16-15	Ар-20-15	Ар-23-15-2	Ар-24-15
$\text{SiO}_2$	51,58	52,23	53,89	53,22	52,10	52,39	56,21	55,88	54,97	56,88	54,09	20,11	19,56	42,31	36,00
$\text{TiO}_2$	0,56	1,16	0,33	0,55	0,59	0,77	0,43	0,49	0,18	0,22	1,61	0,14	0,44	0,41	0,85
$\text{Al}_2\text{O}_3$	44,40	43,46	41,44	39,33	43,79	43,50	38,87	41,59	39,81	39,25	39,59	15,80	14,61	22,66	29,08
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,74	0,77	1,54	2,82	1,51	1,50	1,91	0,31	2,47	0,97	2,26	4,89	62,62	3,22	6,71
MnO	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	1,19	0,03	0,05
MgO	0,17	0,18	1,40	1,16	0,34	0,27	0,18	0,18	0,37	0,16	0,32	20,28	0,64	8,02	6,35
CaO	0,33	0,37	0,28	0,89	0,34	0,38	0,25	0,25	0,44	0,23	0,38	35,27	0,68	13,94	11,34
$\text{Na}_2\text{O}$	0,08	0,14	0,10	0,20	0,10	0,12	0,21	0,06	0,17	0,21	0,13	0,09	0,15	0,28	0,13
$\text{K}_2\text{O}$	0,10	0,17	0,25	0,38	0,11	0,12	1,19	0,28	0,60	1,15	0,49	0,12	0,25	0,89	0,24
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,94	0,63	0,11	0,58	0,34	0,10	0,04	0,04	0,07	0,08	0,10	0,07	0,11	0,20	0,08
BaO	0,08	0,06	0,02	0,05	0,04	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04
LOI	19,69	22,26	23,27	29,68	35,35	53,42	36,41	18,32	17,83	22,05	46,60	57,29	32,44	52,12	30,36
Сумма/Σ	99,00	99,18	99,39	99,20	99,29	99,20	99,39	99,11	99,12	99,24	99,04	96,83	100,28	92,01	90,87
$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,013	0,027	0,008	0,014	0,013	0,018	0,011	0,012	0,005	0,006	0,041	0,009	0,030	0,018	0,029
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,16	1,20	1,30	1,35	1,19	1,20	1,45	1,34	1,38	1,45	1,37	1,27	1,34	1,87	1,24
Компоненты Components	Ар-29-15	Ар-12-18а-15	Ар-62-14	Ар-68-14	Ар-31-17	Ар-4-17	Ар-7-17	Ар-34-17	Ар-25-17	Ар-26-17	Ар-27-17	Ар-80-14	Ар-28-17	Ар-14-14	Ар-22-17
$\text{SiO}_2$	12,78	35,81	26,64	39,10	53,69	41,29	52,68	34,59	51,77	49,69	51,80	53,65	51,35	52,58	52,33
$\text{TiO}_2$	0,10	1,26	0,27	0,25	0,28	0,42	0,20	0,23	3,28	1,38	0,52	0,30	2,02	1,19	1,72
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7,84	28,96	37,98	41,51	41,96	35,14	39,09	32,71	42,49	40,10	39,62	43,27	41,74	42,95	42,40
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,12	21,92	1,75	1,28	1,93	13,08	3,80	15,09	0,53	6,78	6,36	0,84	3,38	1,14	1,22
MnO	0,02	0,30	0,02	0,01	0,01	0,13	0,04	0,10	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01
MgO	27,84	6,95	0,19	0,20	0,20	6,18	2,35	2,36	0,23	0,43	0,18	0,22	0,26	0,40	0,24
CaO	43,71	2,48	5,90	1,43	0,16	0,99	0,32	1,85	0,33	0,33	0,13	0,33	0,37	0,63	0,23
$\text{Na}_2\text{O}$	0,13	0,14	0,26	0,17	0,14	0,15	0,20	0,35	0,11	0,11	0,10	0,08	0,19	0,06	0,11
$\text{K}_2\text{O}$	0,24	0,39	0,10	0,15	0,27	0,15	0,29	0,40	0,20	0,25	0,22	0,24	0,28	0,16	0,49
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,06	0,85	16,99	9,06	0,30	1,48	0,14	8,01	0,17	0,13	0,04	0,09	0,08	0,09	0,19
BaO	0,03	0,05	2,77	2,31	0,10	0,22	0,04	1,48	0,07	0,05	0,02	0,01	0,06	0,03	0,05
LOI	70,50	30,12	23,07	27,39	18,89	25,33	23,46	38,50	25,90	27,08	22,78	79,98	33,36	29,37	21,94
Сумма/Σ	95,88	99,11	92,86	95,47	99,05	99,23	99,15	97,17	99,19	99,28	99,03	99,04	99,75	99,24	98,99
$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,013	0,044	0,007	0,006	0,007	0,012	0,005	0,007	0,077	0,034	0,013	0,007	0,048	0,028	0,041
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,63	1,24	0,70	0,94	1,28	1,18	1,35	1,06	1,22	1,24	1,31	1,24	1,23	1,22	1,23



Тонштейны Бейского месторождения, различающиеся по содержанию основных породообразующих окислов, отличаются и по содержанию микроэлементов (табл. 4). В целом для месторождения в изученных образцах отмечено повышен-

ное относительно среднего состава глинистых сланцев содержание РЗЭ, Zn, Ga, Sr, Y, Zr, Sn, Ba, Pb, Th и U. Основная вероятная причина разнообразия микроэлементного состава тонштейнов заключается в различном составе исходной вулкано-

Таблица 4. Содержание химических элементов в тонштейнах Бейского месторождения, ppm

Table 4. Content of chemical elements in tonsteins of Beysk deposit, ppm

Элементы Elements	Кларк, глины <sup>1</sup> Calrk, clays <sup>1</sup>	риолит rhyolite		риодацит rhyodacite			андезит andesite		базальт basalt	щелочные alkaline		
		Ap-18-17	Ap-8-15	Ap-37-17	Ap-12-17	Ap-31-17	Ap-12-18a-15	Ap-14-14	Ap-25-17	Ap-26-17	Ap-22-17	Ap-28-17
Be	2,8	2,3	0,69	2,2	1,5	0,79	1,4	0,48	1,0	0,64	1,5	0,58
Sc	15,0	5,0	12,8	10,2	10,9	13,3	8,1	4,2	17,7	6,7	8,0	6,5
V	120	12,1	–	18,0	27,8	7,8	–	11,5	37,4	8,4	19,0	12,3
Cr	76,0	10,5	0,6	25,6	22,5	27,2	9,1	6,1	26,7	25,8	28,3	30,5
Co	19,0	5,6	0,28	1,9	6,4	6,1	25,5	1,9	8,4	0,58	3,2	1,4
Ni	47,0	21,9	3,2	10,9	20,3	17,1	183	8,4	9,0	6,0	12,0	8,3
Cu	36,0	16,9	6,4	37,6	28,0	26,9	19,9	28,0	49,5	27,5	22,7	43,5
Zn	52,0	15,4	11,0	150	24,2	208	161	30,6	94,8	163	83,6	151
Ga	16,0	48,6	45,9	51,7	43,3	37,4	28,7	29,8	40,1	37,1	40,8	37,6
As	9	14,1	2,5	1,2	2,0	24,8	226	0,3	2,5	2,5	1,3	1,3
Rb	130	2,6	21,0	2,9	5,6	8,7	12,3	3,2	4,5	5,6	9,9	5,6
Sr	240	198	97	3038	69	1071	187	132	158	263	499	120
Y	31,0	37,8	9,8	25,6	29,1	37,9	48,4	23,7	16,2	32,7	11,2	17,9
Zr	190	279	233	163	145	129	89,0	52,7	141	148	374	117
Nb	11,0	11,6	1,0	9,6	3,8	2,1	7,4	5,8	10,8	16,5	36,4	16,4
Mo	1,6	3,3	0,01	–	1,4	–	2,9	1,5	–	–	–	–
Cd	1,0	0,23	0,26	0,57	0,20	0,81	1,25	1,51	0,59	2,02	0,63	1,19
Sn	3,5	7,7	1,9	5,3	6,5	4,5	1,8	2,7	4,3	5,0	6,5	4,9
Sb	1,0	0,84	0,11	0,81	1,08	0,57	0,41	0,24	0,64	0,66	1,06	0,71
Cs	10,0	0,12	0,20	0,27	0,43	1,30	0,41	0,38	0,63	0,94	0,77	0,30
Ba	460	180	612	520	122	817	694	158	527	334	285	394
La	48,0	104	19,8	126	72,7	60,0	110	80,0	18,1	64,0	97,3	68,8
Ce	75,0	238	44,9	259	163	141	244	172	42,4	171	232	142
Pr	10,0	26,4	4,8	29,3	18,2	14,9	28,3	19,6	5,4	21,4	24,4	16,7
Nd	36,0	90,1	17,7	109	69,8	55,8	103	77,5	23,7	82,7	86,2	64,6
Sm	8,0	17,7	2,9	22,3	12,1	12,0	18,9	13,2	4,1	18,0	13,4	10,9
Eu	1,2	2,0	0,54	3,7	1,9	2,5	4,3	2,7	1,1	2,9	1,8	2,0
Gd	5,8	14,3	2,5	22,0	9,9	11,5	16,6	11,1	4,0	13,6	8,3	8,3
Tb	0,80	1,9	0,38	2,4	1,4	1,5	1,9	1,2	0,61	1,6	0,99	0,99
Dy	4,4	10,7	2,2	10,8	7,6	8,3	8,5	6,8	3,6	9,0	5,0	4,9
Ho	0,70	1,53	0,41	1,42	1,21	1,39	1,53	1,1	0,69	1,48	0,97	0,81
Er	1,90	4,07	1,19	2,8	3,62	3,9	4,7	3,2	2,4	4,5	2,6	2,4
Tm	0,60	0,51	0,18	0,23	0,44	0,48	0,66	0,38	0,30	0,57	0,37	0,32
Yb	2,50	3,3	1,3	1,3	3,0	3,5	4,0	2,5	2,0	3,8	2,3	2,2
Lu	0,40	0,40	0,17	0,14	0,40	0,41	0,58	0,33	0,31	0,55	0,31	0,30
Hf	5,0	10,6	5,1	5,6	5,4	3,7	2,5	2,7	3,8	5,2	10,5	3,8
Ta	1,4	3,2	0,68	3,2	0,92	0,86	1,0	0,97	0,96	2,4	4,1	1,9
W	2,6	0,57	0,37	3,1	0,68	2,7	4,0	1,5	3,6	4,2	5,2	4,8
Au	0,0065	0,040	<0,002	0,0076	0,0047	0,051	0,024	0,0005	0,0018	0,025	0,0067	0,0019
Hg	0,089	0,27	0,032	0,25	0,26	0,33	0,075	0,076	0,093	0,22	0,096	0,19
Pb	14,0	59,0	40,5	82,6	46,0	74,4	13,7	33,7	44,7	54,2	80,6	74,1
Th	10,0	130	19,7	145	92,0	93,8	17,0	13,7	8,8	27,0	52,8	25,0
U	4,5	24,4	6,0	12,4	13,4	9,9	53,3	10,9	6,7	16,2	36,8	11,6

Примечание: – нет данных; 1 – по [18].

Notes: – no data; 1 – by [18].

генной пирокластики. В табл. 4 в качестве примера приведены содержания химических элементов в основных типах тонштейнов черногорской свиты Бейского месторождения. Показаны группы тонштейнов, образовавшихся из пирокластики различного состава: от риолитов до базальтоидов.

#### Обсуждение результатов

Близкий минеральный состав большинства изученных тонштейнов, обусловленный преобразованием исходного материала в достаточно агрессивной, богатой органическими кислотами среде торфяного болота, осложняет диагностику первичного их состава. Как правило, тонштейны в основной массе представлены каолинитом с небольшим количеством других минеральных фаз. Реликтовые структуры и типы псевдоморфных минералов, диагностируемые в тонштейнах, являются показателем того, что изученные тонштейны сформировались из пеплового материала, поступившего в палеоторфяник [19]. Однако минеральный состав тонштейнов не позволяет реставрировать исходный состав пеплового материала из-за практически полного преобразования в агрессивной среде торфяного болота.

Диаграмма – сумма щелочей-кремнезем (TAS), используемая для химической классификации вулканических горных пород, не применима к тонштейнам, из-за потери  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  при преобразовании вулканического пепла в тонштейн. Для идентификации первичного состава вулканогенной пирокластики традиционно используются химические элементы малоподвижные в зоне гипергенеза. К этой группе элементов относятся Al, Ti, Zr, Y, Nb [9, 13, 20].

На отношении  $\text{Zr}/\text{Ti}$  к  $\text{Nb}/\text{Y}$ , входящих в группу инертных элементов, основана классификационная диаграмма Дж.А. Винчестера и Р.А. Флойда [21]. Согласно классификационной диаграмме (рис. 5), тонштейны Бейского месторождения образовались из вулканогенной пирокластики преимущественно риодацитового и андезитового составов. При использовании классификационной диа-

граммы следует учитывать более значительный вынос циркония из пепловых горизонтов по сравнению с титаном в процессе разложения первичного минерального вещества. Данный вывод основан на выявленных фактах повсеместного, иногда весьма значительного накопления циркония в углях, находящихся вблизи тонштейнов в непосредственном контакте с ними [1, 22, 23]. Он подтвержден также многочисленными находками корродированных кристаллов циркона в тонштейнах (рис. 6) [9].

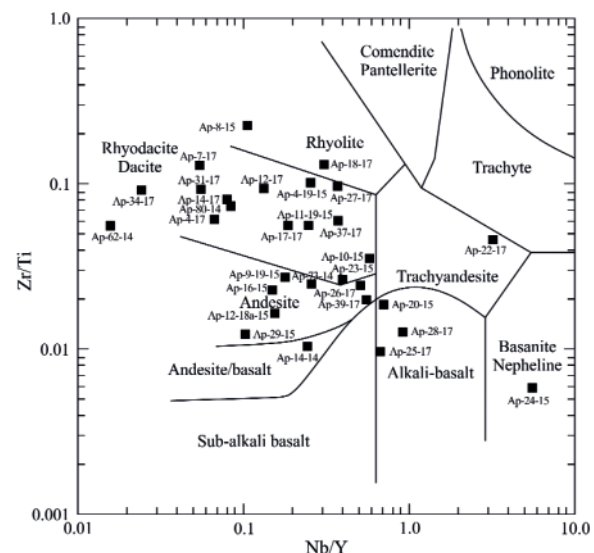


Рис. 5. Классификационная диаграмма тонштейнов Бейского месторождения [21]

Fig. 5. Discriminant diagram of tonsteins of the Beysk deposit [21]

Основной трудностью в диагностике исходного состава вулканогенной пирокластики является перераспределение вещества при преобразовании пеплового материала в палеоболотной среде. В связи с этим в угле, находящемся в угольном пласте как выше, так и ниже тонштейна, наблюдаются специфические геохимические ассоциации, обусловленные особенностями состава первичной вулканогенной пирокластики.

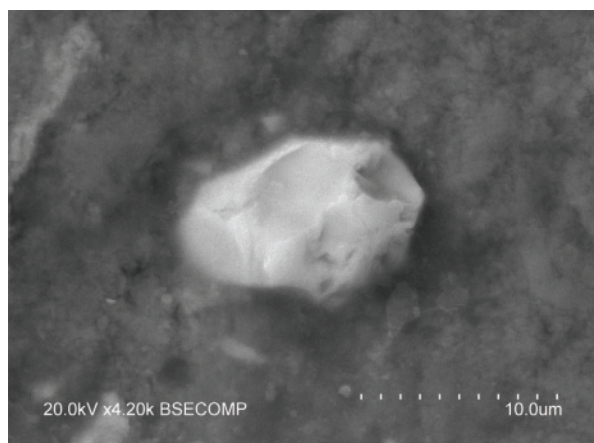
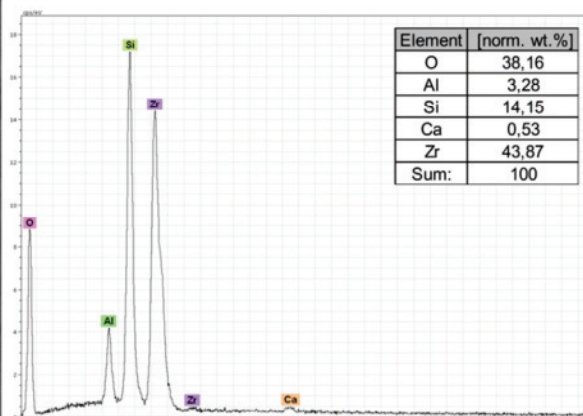


Рис. 6. Корродированный кристалл циркона в тонштейне

Fig. 6. Corroded zircon crystal in tonstein



В пласте 16 обнаружено три тонштейна (Ар-31–17, Ар-4–17, Ар-7–17), сформировавшихся из вулканогенной пирокластической кислого состава. В золах углей, находящихся на контакте с тонштейном и на незначительном удалении (1–5 см) от них, отмечаются контрастные аномалии  $P3Э$  – 0,38 %,  $Zr$  – 0,57 %,  $Hf$  – 167 г/т,  $Ta$  – 57 г/т,  $Nb$  – 416 г/т,  $Y$  – 450 г/т,  $Th$  – 290 г/т. Эти данные согласуются с выводами о редкометалльной  $Nb$ - $Ta$ - $Zr$ - $Y$ - $Th$ -редкоземельной специализации углей Минусинского бассейна, обусловленной вулканогенной природой ее формирования, связанной с пирокластикой преимущественно кислого состава [1].

Все эти данные свидетельствуют, что для достоверной диагностики состава первичного вулканогенного пирокластического материала, сформировавшего тонштейны, необходимо использовать комплексный подход. Так, при совмещении ТМ ( $TiO_2/Al_2O_3$ ) и классификационной диаграммы ( $Zr/Ti$  к  $Nb/Y$ ) возможна реставрация первоначального состава пеплов.

Важным критерием для диагностики первичного состава тонштейнов является их геохимическая специализация, выраженная в избыточном накоплении определенных групп химических элементов как в самих тонштейнах, так и в углях на контакте с ними. В первую очередь это элементы-гидролизаты. Для кислых и щелочных пород характерно накопление  $Zr$ ,  $Hf$ ,  $Ta$ ,  $Nb$ ,  $P3Э$ ,  $Y$ , реже  $Ga$ ,  $Sn$ ,  $Sr$ ,  $Be$  и других литофильных элементов. Для базитов характерно накопление элементов-сидерофилов.

В качестве дополнительного критерия можно использовать  $Th$ , позволяющий отчетливо разделять пирокластический кислого и основного состава. Для вулканогенной пирокластической кислого и щелочного составов характерно высокое содержание  $Th$  (13,5–145,2 г/т). Для разностей среднего и основного составов характерны более низкие содержания тория, вплоть до 0,8 г/т.

Проведенные минералого-геохимические исследования показали, что в целом в изученном разрезе преобладала вулканогенная пирокластическая кислого состава (риолиты, риодациты). При этом в пласте 15' вулканогенная пирокластическая представлена разностями щелочного состава. Выше по разрезу состав пеплового материала изменяется до риодацитового (пласт 15). Залегающие выше пласты 16', 16, 16а вмещают прослои измененной пирокластической кислого состава. Еще выше по разрезу, в пластах 17' и 18а, обнаружены тонштейны, образованные из вулканогенных пеплов риодацитового состава. Самые верхние пласты этой части угленосного разреза 19, 19а, 19б также содержат пирокластическую преимущественно кислого состава.

Источник вулканогенного пеплового материала в углях Минусинского бассейна достоверно не установлен. Существует несколько точек зрения на эту проблему. По мнению В.М. Богомазова, в период угленакопления источник вулканических извержений располагался на западе и северо-запа-

де Алтае-Саянской складчатой области [5]. Л.А. Адмакин предполагал, что источник мог находиться на территории современного Западного Саяна [7]. Согласно еще одной точке зрения, источник пеплового материала располагался на юге Монголии, в Обь-Иртышской зоне смятия [24].

Очевидно, что с приближением к источнику мощность отложений вулканогенного пирокластического материала будет увеличиваться. На северо-западе Монголии в позднекаменноугольных углях месторождения Нурст Хотгор диагностируются тонштейны мощностью до 30 см [9], что говорит о близком расположении источника вулканогенного материала к этому угольному месторождению, нежели к Бейскому месторождению Минусинского бассейна. Малые мощности выявленных вулканогенных прослоев не исключают участия вулканитов этого региона в формировании тонштейнов Бейского месторождения. Однако критериев, позволяющих надежно привязать эти измененные пепловые породы к тому или иному конкретному источнику вулканизма, пока не выделено.

#### Заключение

Тонштейны Бейского месторождения имеют отличительные минералогические и геохимические особенности, которые позволяют идентифицировать их как преобразованную вулканогенную пирокластическую. В их составе преобладает каолинит. Менее распространены кварц, кристобалит, тридимит, фосфаты, полевые шпаты и отдельные акцессорные минералы (циркон, монацит, ксенотим). Встречаются сидерит и доломит.

Комплекс методов позволил определить состав исходного пеплового материала, послужившего источником для формирования тонштейнов. Среди изученных тонштейнов преобладают продукты преобразования кислой пирокластической преимущественно риолитового и риодацитового состава. Менее распространены тонштейны – производные пеплов среднего состава, и исключительно редко встречаются тонштейны, образованные из пеплов основного и щелочно-основного состава.

По химическому составу преобладают тонштейны, близкие к составу каолинита. Реже встречаются фосфатные тонштейны с содержанием  $P_2O_5$  до 16,99 %. Редко встречаются тонштейны, обогащенные эпигенетическими карбонатами, с повышенным содержанием  $Ca$ ,  $Mg$  и  $Fe$ . Исследования показали, что с вулканогенным пирокластическим материалом в углях черногорской свиты Бейского месторождения связаны контрастные аномалии  $P3Э$ ,  $Zr$ ,  $Hf$ ,  $Ta$ ,  $Nb$ ,  $Y$  и  $Th$ .

Существует проблема нахождения источника вулканогенной пирокластической, из которой сформировались тонштейны. Выяснение месторасположения источника позволит проследить закономерность в динамике изменения состава пирокластической.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: ИД «Д-Принт», 2007. – 468 с.
2. Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal // *Organic geochemistry* / Eds. M.H. Engel, S. Masco. – New York: Plenum, 1993. – P. 593–607.
3. Ван А.В. Вулканоогенный пепел в угленосных отложениях верхнего палеозоя Средней Сибири // *Литология и полезные ископаемые*. – 1972. – № 1. – С. 40–51.
4. Ван А.В. Вулканизм и угленакопление // *Вопросы литологии Сибири. Труды Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья*. – Новосибирск, 1973. – Вып. 170. – С. 14–21.
5. Богомазов В.М. Стратиграфия и условия образования доугленосных и угленосных отложений карбона и перми Минусинского бассейна // *Вопросы геологии угленосных отложений азиатской части СССР*. – М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. – С. 79–116.
6. Редкометалльный потенциал углей Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, Л.П. Рихванов, Т.Ю. Усова, В.В. Кяргин, А.А. Булатов, Н.Е. Дубовик. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, филиал «Гео», 2003. – 347 с.
7. Адмакин Л.А. Тонштейны – геохронометры древних эруптивных циклов // *Доклады Академии наук СССР*. – 1991. – Т. 320. – № 5. – С. 1194–1197.
8. Адмакин Л.А. Типы тонштейнов в угольных пластах Минусинского бассейна // *Литология и полезные ископаемые*. – 1992. – № 2. – С. 49–56.
9. Минералого-геохимическая идентификация продуктов эксплозивного вулканизма в углях Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, С.С. Ильенок, А.В. Вергунов, М.В. Шалдыбин, В.М. Соболенко, П.Е. Некрасов // *Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 9 Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием*. – Томск: Изд-во Томского центра научно-технической информации, 2017. – С. 35–37.
10. Угольная база России. Т. 3. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири. – М.: ООО «Геоинформцентр», 2002. – 488 с.
11. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-46 – Абакан. – СПб.: Картфабрика Всероссийского научно-исследовательского геологического института, 2008.
12. Bohor B.F., Triplehorn D.M. Tonsteins: Altered Volcanic Ash Layers in Coal-bearing Sequences // *Geological Society of America*. – 1993. – V. 285 (Special Paper). – P. 42.
13. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance / S. Dai, C.R. Ward, I.T. Graham, D. French, J.C. Hower, L. Zhao, X. Wang // *Earth-Science Reviews*. – 2017. – V. 175. – P. 44–74.
14. Erkoyuna H., Kadira S., Huggett J. Occurrence and genesis of tonsteins in the Miocene lignite, Tuncbilek Basin, Kütahya, western Turkey // *Int. J. of Coal Geol.* – 2019. – V. 202. – P. 46–68.
15. Rare earth element and yttrium content of coal in the Banko coalfield, South Sumatra Basin, Indonesia: Contributions from tonstein layers / F. Anggara, D.H. Amijaya, A. Harijoko, T.N. Tambaria, A.A. Sahri, Z.A. Nur Asa // *Int. J. of Coal Geol.* – 2018. – V. 196. – P. 159–172.
16. Spears D.A. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks // *Int. J. of Coal Geol.* – 2012. – V. 94. – P. 22–31.
17. Crowley S.S., Stanton R.W., Ryer T.A. The effects of volcanic ash on the maceral and chemical composition of the C coal bed, Emery Coal Field, Utah // *Org. Geochem.* – 1989. – V. 14. – P. 315–331.
18. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust // *Geochemistry International*. – 2003. – V. 41. – № 7. – P. 711–718.
19. Адмакин Л.А. Классификация и номенклатура тонштейнов // *Литология и полезные ископаемые*. – 1995. – № 6. – С. 643–653.
20. Burger K., Zhou Y., Ren Y. Petrography and geochemistry of tonsteins from the 4<sup>th</sup> Member of the Upper Triassic Xujiahe formation in southern Sichuan Province, China // *Int. J. Coal Geol.* – 2002. – V. 49. – P. 1–17.
21. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // *Chemical Geology*. – 1977. – V. 20. – P. 325–343.
22. Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky // *Int. J. Coal Geology*. – 1999. – V. 39. – P. 141–153.
23. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia) / S.I. Arbutov, A.M. Mezhibor, D.A. Spears, S.S. Ilenok, M.V. Shaldybin, E.V. Belaya // *International Journal of Coal Geology*. – 2016. – V. 152. – P. 99–111.
24. Зотова Е.А. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-46 – Абакан. Объяснительная записка / под ред. Е.А. Зотовой. – СПб.: Картфабрика Всероссийского научно-исследовательского геологического института, 2008. – 399 с.

Поступила 30.01.2019 г.

## Информация об авторах

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

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

**Соболенко В.М.**, главный геолог ОАО «Разрез Аршановский».



UDC 552.57, 552.52

## MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF TONSTEINS IN THE BEYSK COAL DEPOSIT OF THE MINUSINSK COAL BASIN

Alexey V. Vergunov<sup>1</sup>,  
alexeivergunov@rambler.ru

Sergey I. Arbuzov<sup>1</sup>,  
siarbuzov@mail.ru

Victor M. Sobolenko<sup>2</sup>,  
v.sobolenko@arshanovskiy.ru

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

<sup>2</sup> JSC «Arshanovsky Coal Mine»,  
20, Lermontov street, Abakan, 655016, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the necessity for assessment of volcanic pyroclastic material impact on formation of geochemical background of rare elements in coal.

**The main aim** is to study the mineralogical and geochemical features of tonsteins and enclosing coals of chernogorskaya suite in the Beysk coal deposit (Minusinsk coal basin).

**Objects** of the research are tonsteins and enclosing coals of chernogorskaya suite in the Beysk coal deposit (Minusinsk coal basin).

**Methods:** sampling of coal seams of chernogorskaya suite in the Beysk coal deposit; chemical composition is estimated with inductively coupled plasma mass-spectrometry, instrumental neutron activation analysis, x-ray fluorescence methods; mineral composition is defined with optical microscopy, petrographic analysis, scanning electron microscopy, x-ray diffractometry.

**Results.** The paper studies mineralogical and geochemical characteristics of the tonsteins in chernogorskaya suite of the Beysk coal deposit (Minusinsk coal basin). Tonsteins of the Beysk deposit are divided into two types: 1. tonsteins of kaolinite (70–100 %) composition, 2. tonsteins of mixed composition. Few kaolinite seams contain  $P_2O_5$  up to 20 %. Integrated mineral and geochemical analysis allow determining the composition of the initial ash material, which served as a source for formation of tonsteins. Tonsteins formed from felsic volcanogenic pyroclastics are predominant; tonsteins of intermediate volcanic ash are less widespread. Tonsteins formed from mafic and alkaline-base volcanic material are rare. Investigations show that volcanogenic pyroclastics played a significant role in accumulation of rare-earth elements, Zr, Hf, Ta, Nb, Y, Th, and U in coals of chernogorskaya suite in the Beysk coal deposit. We also discussed possible sources of ashes that formed the tonsteins.

### Key words:

Coal, tonsteins, geochemistry, volcanogenic pyroclastics, volcanic ash.

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

### REFERENCES

1. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-Print Publ. house, 2007. 468 p.
2. Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal. *Organic Geochemistry*. Eds. M.H. Engel, S. Macko. New York, Plenum, 1993. pp. 593–607.
3. Van A.V. Vulkanogenny pepel v ugleonosnykh otlozheniyakh verkhnego paleozoya Sredney Sibiri [Volcanogenic ash in coal-bearing sediments of the Upper Paleozoic of Middle Siberia]. *Lithology and mineral*, 1972, no. 1, pp. 40–51.
4. Van A.V. Vulkanizm i uglenakopleniye [Volcanism and coal accumulation]. *Voprosy litologii Sibiri. Trudy Sibirskogo nauchno-isledovatel'skogo instituta geologii, geofiziki i mineralnogo syrya* [Issues of lithology of Siberia. Proc. of Siberian research institute of geology, geophysics and mineral raw materials]. Novosibirsk, 1973. Vol. 170, pp. 14–21.
5. Bogomazov V.M. Stratigrafiya i usloviya obrazovaniya dupleonosnykh i ugleonosnykh otlozheniy karbona i permi Minusinskogo basseyna [Stratigraphy and conditions for formation of pre-carboniferous and coal-bearing carbon and Permian deposits of the Minusinsk basin]. *Voprosy geologii ugleonosnykh otlozheniy aziatskoy chasti SSSR* [Geology of coal-bearing sediments in the Asian part of the USSR]. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1961. pp. 79–116.
6. Arbuzov S.I., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Usova T.Yu., Kyargin V.V., Bulatov A.A., Dubovik N.E. *Redkometallny potentsial ugley Minusinskogo basseyna* [Raremetal potential of the Minusinsk coal basin]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Press, 2003. 347 p.
7. Admakina L.A. Tonshteyny – geokhronometry drevnikh eruptivnykh tsiklov [Tonsteins as Geochronometers of Ancient Eruptive Cycles]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1991, vol. 320, no. 5, pp. 1194–1197.
8. Admakina L.A. Tipy tonshteynov v ugleonosnykh plastakh Minusinskogo basseyna [Types of tonsteins in coal beds of the Minusinsk basin]. *Lithology and minerals*, 1992, no. 2, pp. 49–56.
9. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Vergunov A.V., Shal'dybin M.V., Sobolenko V.M., Nekrasov P.E. Mineralogo-geokhimicheskaya identifikatsiya produktov eksplozivnogo vulkanizma v uglyakh Minusinskogo basseyna [Mineralogical and geochemical identification of products of explosive volcanism in the coals of the Minusinsk basin]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Vyp. 9 Materialy IX Vserossiyskoy petrograficheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Iss. 9 Materials of the IX All-Russian

- an Petrographic Conference with international participation]. Tomsk, Tomsk scientific and technical information center Publ. 2017. pp. 35–37.
10. *Ugolnaya baza Rossii. T. 3. Ugolnye basseyny i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri* [Coal base of Russia. Vol. III. Coal basins and deposits of Eastern Siberia]. Moscow, Geoinformtsentr Publ., 2002. 488 p.
  11. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N-46, Abakan* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Altai-Sayan. Sheet N-46, Abakan]. St-Petersburg, Cartridge factory Russian Geological Research Institute, 2008.
  12. Bohor B.F. Tonsteins: Altered Volcanic-Ash Layers in Coal-Bearing Sequences. *Geological Society of America*, 1993, vol. 285 Spec. Paper, pp. 42.
  13. Dai S., Ward C.R., Graham I.T., French D., Hower J.C., Zhao L., Wang X. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 175, pp. 44–74.
  14. Erkoyuna H., Kadira S., Huggett J. Occurrence and genesis of tonsteins in the Miocene lignite, Tunçbilek Basin, Kütahya, western Turkey. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 202, pp. 46–68.
  15. Anggara F., Amijaya D.H., Harijoko A., Tambaria T.N., Sahri A.A., Nur Asa Z.A. Rare earth element and yttrium content of coal in the Banko coalfield, South Sumatra Basin, Indonesia: Contributions from tonstein layers. *International Journal of Coal Geology*, 2018, vol. 196, pp. 159–172.
  16. Spears D.A. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks. *Int. J. of Coal Geol.*, 2012, vol. 94, pp. 22–31.
  17. Crowley S.S., Stanton R.W., Ryer T.A. The effects of volcanic ash on the maceral and chemical composition of the C coal bed, Emery Coal Field, Utah. *Organic Geochemistry*, 1989, vol. 14, pp. 315–331.
  18. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*, 2003, vol. 41, no. 7, pp. 711–718.
  19. Admakina L.A. Klassifikatsiya i nomenklatura tonshteynov [Tonsteins: Classification and Nomenclature]. *Lithology and minerals*, 1995, no. 6, pp. 643–653.
  20. Burger K., Zhou Y., Ren Y. Petrography and geochemistry of tonsteins from the 4<sup>th</sup> Member of the Upper Triassic Xujiahe formation in southern Sichuan Province, China. *Int. J. Coal Geol.*, 2002, vol. 49, pp. 1–17.
  21. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 1977, vol. 20, pp. 325–343.
  22. Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky. *International Journal of Coal Geology*, 1999, vol. 39, pp. 141–153.
  23. Arbuzov S.I., Mezhibor A.M., Spears D.A., Ilenok S.S., Shal'dybin M.V., Belaya E.V. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia). *International Journal of Coal Geology*, 2016, vol. 152, pp. 99–111.
  24. Zotova E.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N-46, Abakan. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Altai-Sayan. Sheet N-46, Abakan. Explanatory note]. St-Petersburg, Cartridge factory Russian Geological Research Institute, 2008. 399 p.

Received: 30 January 2019.

#### Information about the authors

**Alexey V. Vergunov**, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

**Victor M. Sobolenko**, chief geologist, JSC «Arshanovsky Coal Mine».

УДК 532.546:536.421

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В КУПОЛЕ С УЧЁТОМ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ, ЛИМИТИРУЮЩЕГОСЯ ТЕПЛООБМЕНОМ

Кильдибаева Светлана Рустамовна<sup>1</sup>,  
freya.13@mail.ru

Гималтдинов Ильяс Кадинович<sup>2</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

<sup>1</sup> Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,  
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность** исследования связана с увеличением масштабов добычи углеводородов в шельфовой зоне Мирового океана и сопутствующими рисками аварийных разливов углеводородов. В качестве одного из способов ликвидации последствий глубоководных утечек предлагается установка купола над местом утечки. При ликвидации разлива нефти на нефтедобывающей платформе Deepwater Horizon была предпринята попытка установки устройства в виде купола, но гидраты, накопленные внутри купола, придавали конструкции плавучесть, вследствие чего купол всплывал и не мог быть зафиксирован. В связи с этим необходимо исследовать процесс гидратообразования и исключить его негативное влияние на работу купола. Для описания гидратообразования на поверхности пузырьков метана предложена предельная схема, согласно которой гидратообразование лимитируется теплообменом. В более ранних работах было рассмотрено накопление углеводородов с учётом гидратообразования, лимитируемого диффузией, что является другим предельным случаем описания гидратообразования. Исследуется математическая модель работы купола. В устройстве предусмотрены трубки для откачки накопленных углеводородов, это позволит избежать проблем с всплытием купола из-за накопления газа и гидрата.

**Цель:** исследовать особенности накопления углеводородов (нефти, газа, гидрата) в куполе для случая, когда гидратообразование лимитируется теплообменом с окружающей средой.

**Объект:** струя углеводородов, состоящая из воды, капель нефти, пузырьков газа и композитных пузырьков, которая попадая в купол, приводит к накоплению углеводородов в нём. Теплофизические характеристики окружающей среды соответствуют условиям стабильного существования гидрата.

**Методы.** Построена математическая модель накопления углеводородов в куполе. Для описания процессов теплообмена использована система уравнений, включающая законы сохранения масс для компонентов, поступающих из струи (газ, нефть и гидрат), уравнения сохранения энергии для слоев газа и нефти, а также вспомогательные уравнения для расчетов тепловых потоков.

**Результаты.** Рассмотрен процесс накопления углеводородов в куполе в случае, когда гидратообразование на поверхности пузырьков метана лимитируется теплообменом. Когда плотность композитных пузырьков больше плотности нефти, слой гидрата (образованного композитными пузырьками) накапливается между слоями нефти и воды, в случае, когда плотность пузырька меньше плотности нефти, слой гидрата (образованного композитными пузырьками) накапливается между слоями газа и нефти. Определены температурные поля для углеводородов, накопленных внутри купола. С течением времени температуры слоев газа и нефти стремятся к температуре поступающих из струи нефти и газа.

### Ключевые слова:

Купол, разлив углеводородов, шельф, нефть, гидрат, гидратообразование.

### Введение

Исследование новых способов добычи, разведки и оценки запасов природных ресурсов носит приоритетный характер в связи с уменьшением запасов углеводородов [1, 2]. Повреждения нефтедобывающих конструкций и опасность разлива углеводородов в океан, как это было в Мексиканском заливе [3] и Северном море [4], многократно увеличивают интерес исследователей к изучению способов ликвидации утечек. В случаях таких разливов углеводороды распространяются в виде затопленной струи [5–8]. Одним из наиболее привлекательных способов устранения утечек является установка купола для сбора и эвакуации углеводородов с целью их дальнейшего использования. Технологическая схема работы купола для сбора углеводородов приводится в работе [9].

В случаях, когда повреждение нефтедобывающей конструкции происходит на больших глубинах Мирового океана, зачастую теплофизические характеристики окружающей среды соответствуют условиям стабильного существования гидрата. В таких случаях пузырьки метана будут превращаться в гидратные частицы [10–13]. Накапливаясь внутри купола, гидратные частицы могут придать ему нежелательную плавучесть, помешав установке. Таким образом, процесс гидратообразования должен быть детально рассмотрен в рамках исследования накопления углеводородов в куполе.

В работе [14] рассмотрена модель работы купола, который исключает накопление гидрата. В работе [15] был рассмотрен процесс установки купола для ликвидации нефтегазовых утечек на дне океана при условии, что процесс гидратообразова-

ния лимитируется диффузией. Это является одним из предельных режимов, принятых для описания гидратообразования. Другим предельным случаем является описание гидратообразования с помощью схемы теплообмена, которая более подробно рассматривается в этой работе. Согласно исследованиям, приведенным в работе [16], было выявлено, что образование гидрата в случае, когда гидратообразование, лимитируется теплообменом с окружающей средой, протекает быстрее, чем в случае диффузионного переноса газа через гидратную оболочку. Вследствие этого газовый пузырек полностью успевает превратиться в гидратную частицу. Процесс гидратообразования начинается, когда пузырек поднялся выше  $h^*$ . Композитными пузырьками будем называть такие пузырьки метана, на поверхности которых уже начала образовываться гидратная оболочка, но полного превращения в гидратную частицу ещё не произошло. В процессе миграции в струе плотность композитного (газ+гидрат) пузырька увеличивается от плотности газа до плотности гидрата. Плотность композитного пузырька становится больше плотности нефти  $\rho_{com} > \rho_o$  на высоте  $h_2^*$ .

#### Постановка задачи

Будем полагать, что газ, нефть и композитные пузырьки, поступающие внутрь купола из струи [17–21], естественным образом сепарируются внутри купола и образуют соответствующие слои: газа, нефти и гидрата. Расслоение поступающих из струи углеводородов будет происходить согласно плотностям компонентов (рис. 1).

Пусть координаты  $z_{oh}$  и  $z_{hw}$  соответствуют границам нефть–гидрат и гидрат–вода. Будем полагать, что вначале слой гидрата будет накапливаться ниже слоя нефти до тех пор, пока выполняются условия  $\rho_{com} > \rho_o$  и  $z_{hw} \geq h_2^*$ , а при  $z_{hw} < h_2^*$  слой гидрата будет накапливаться выше слоя нефти, т. к.  $\rho_{com} < \rho_o$ . Вследствие этого поступающие из струи углеводороды расслаиваются внутри купола в следующем порядке (сверху вниз): газ; композитные пузырьки, плотность которых меньше плотности нефти; нефть; композитные пузырьки, плотность которых больше плотности нефти.

Пусть индекс ( $h_1$ ) относится к слою гидрата, образованного композитными пузырьками, плотность которых больше плотности нефти  $\rho_{com} > \rho_o$ ; индекс ( $h_2$ ) относится к слою гидрата, образованного композитными пузырьками, плотность которых меньше плотности нефти  $\rho_{com} < \rho_o$ . Вследствие этого поступающие из струи углеводороды расслаиваются внутри купола в следующем порядке (сверху вниз): газ – на участке  $z_{gh_2} < z < z_n$ , гидрат (образованный композитными пузырьками меньшей плотности) – на участке  $z_{gh_2} < z < z_{h_{2o}}$ , нефть – на участке  $z_{h_{2o}} < z < z_{oh_1}$ , гидрат (образованный композитными пузырьками большей плотности) – на участке  $z_{oh_1} < z < z_{h_{1w}}$ .

#### Основные уравнения

Законы сохранения масс для углеводородов, поступающих из струи (газ и нефть), запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dM_g}{dt} &= m_g^+ - m_g^-, & \frac{dM_o}{dt} &= m_o^+ - m_o^-, \\ m_g^+ &= \rho_g Q_g^e, & m_o^+ &= \rho_o Q_o^e, \\ m_g^- &= \begin{cases} 0, & t < t^* \\ \rho_g Q_g^e, & t \geq t^* \end{cases}, & m_o^- &= \begin{cases} 0, & t < t^* \\ \rho_o Q_o^e, & t \geq t^* \end{cases}, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь  $M_i$ ,  $Q_i$  – масса и объемный расход  $i$ -го компонента в куполе;  $m_i^+$ ,  $m_i^-$  – массовые расходы  $i$ -го компонента, поступающего и откачиваемого из купола;  $t^*$  – время начала откачивания углеводородов из купола. Нижние индексы  $i=(g,o)$  относятся к газу и нефти, верхние индексы  $+$  и  $-$  относятся к «поступающему» и «откачиваемому» компоненту.

Законы сохранения масс для слоев композитных пузырьков запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dM_{h_1}}{dt} &= m_{h_1}^+, & \frac{dM_{h_2}}{dt} &= m_{h_2}^+, \\ \begin{cases} m_{h_1}^+ = \rho_{com} Q_g, & \rho_{com} > \rho_o \\ m_{h_1}^+ = 0, & \rho_{com} < \rho_o \end{cases}, & \\ \begin{cases} m_{h_2}^+ = \rho_{com} Q_g, & \rho_{com} < \rho_o \\ m_{h_2}^+ = 0, & \rho_{com} > \rho_o \end{cases}, & \end{aligned} \quad (2)$$

здесь  $m_{h_1}^+$ ,  $m_{h_2}^+$  – массовые расходы композитных пузырьков, поступающих в контрольный объем (КО). Согласно оценкам, приведенным в работе [22], разложением гидрата можно пренебречь.

При сепарации поступающей из скважины смеси с течением времени в куполе возникают области, насыщенные газом, гидратом (образованным композитными пузырьками меньшей плотности), нефтью, гидратом (образованным композитными пузырьками большей плотности) и водой. Соответственно, масса данных продуктов в куполе определяется выражениями:

$$\begin{aligned} M_g &= \int_{z_{gh_2}}^{z_n} \rho_g S_d(z) dz, & M_{h_2} &= \int_{z_{h_{2o}}}^{z_{gh_2}} \rho_{h_2} S_d(z) dz, \\ M_o &= \int_{z_{oh_1}}^{z_{h_{2o}}} \rho_o S_d(z) dz, \\ M_{h_1} &= \int_{z_{h_{1w}}}^{z_{oh_1}} \rho_{h_1} S_d(z) dz, & M_w &= \int_{z_0}^{z_{h_{1w}}} \rho_w S_d(z) dz, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\rho_i$  – плотность  $i$ -й фазы;  $S_d(z)$  – площадь сечения купола; нижние индексы  $i=(g,h,o,w)$  относятся соответственно к газу, гидрату, нефти и воде.

Законы сохранения энергии для слоев нефти и газа запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dU_o}{dt} &= -S_d q_{oh_1} - S_d q_{h_{2o}} + c_o m_o^+ T_o^+ - c_o m_o^- T_o^-, \\ U_o &= c_o M_o T_o, \end{aligned} \quad (4)$$



$$\frac{dU_g}{dt} = -S_d q_{gh_2} + c_g m_g^+ T_g^+ - c_g m_g^- T_g^-, U_g = c_g M_g T_g, (5)$$

здесь  $q_{oh_1}$ ,  $q_{h_2o}$ ,  $q_{gh_2}$  – тепловые потоки между слоями нефти и гидрата, гидрата и нефти, газа и гидрата;  $T_o^+$  и  $T_g^+$  – температуры нефти и газа, поступающие в соответствующие слои из струи.

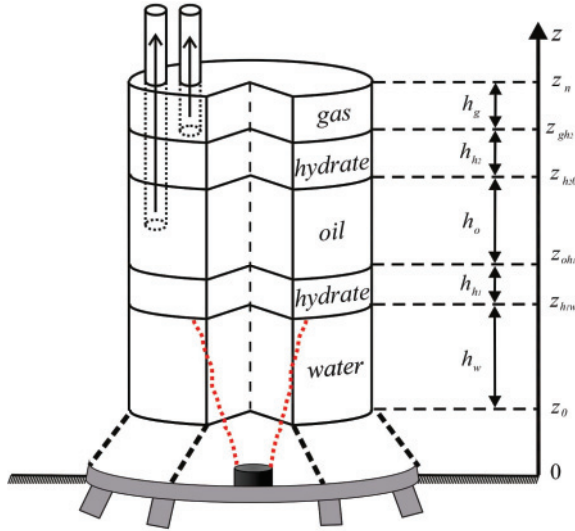


Рис. 1. Схема купола и распределения компонентов внутри купола для случая глубоководья при гидратообразовании, лимитируемом теплообменом. Здесь  $z_{gh_2}$  – координата раздела слоев газа и гидрата;  $z_{h_2o}$  – координата раздела слоев гидрата и нефти;  $z_{oh_1}$  – координата раздела слоев нефти и гидрата;  $z_{h_1w}$  – координата раздела слоев гидрата и воды;  $z_n$  и  $z_o$  соответствуют верхнему и нижнему основанию купола;  $h_g$ ,  $h_o$ ,  $h_w$  – толщины слоев газа, нефти и воды. Красная пунктирная линия соответствует схематическому обозначению струи

Fig. 1. Scheme of the dome and distribution of components inside the dome for the case of deep water in hydrate formation, limited by heat exchange. Here  $z_{gh_2}$  is the coordinate section of the layers of gas and hydrate;  $z_{h_2o}$  is the coordinate section of the layers of hydrate and oil;  $z_{oh_1}$  is the coordinate section of the layers of hydrate and water;  $z_n$  and  $z_o$  correspond to the upper and lower base of the dome;  $h_g$ ,  $h_o$ ,  $h_w$  is the thickness of the layers of gas, oil and water. The red dotted line corresponds to the schematic designation of the jet

Тепловой поток между слоями нефти и гидрата  $q_{oh_1}$  определим, используя выражение для теплообмена для полуограниченного тела согласно [23]:

$$q_{oh_1} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\pi \kappa_o \tau_o}} (T_o - T_{hs}), (6)$$

здесь  $\lambda_o$  – коэффициент теплопроводности нефти;  $\kappa_o = \lambda_o / \rho_o c_o$  – коэффициент температуропроводности нефти;  $\tau_o$  – время, которое соответствует началу накопления слоя нефти.

Тепловые потоки между слоями гидрата и нефти  $q_{h_2o}$  и газа и гидрата  $q_{gh_2}$  определим, используя выражение для теплообмена для полуограниченного тела согласно [23]:

$$q_{h_2o} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\pi \kappa_o \tau_{h_2}}} (T_o - T_{hs}), q_{gh_2} = \frac{\lambda_g}{\sqrt{\pi \kappa_g \tau_g}} (T_g - T_{hs}), (7)$$

здесь  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа;  $\kappa_g = \lambda_g / \rho_g c_g$  – коэффициент температуропроводности газа;  $\tau_g$  и  $\tau_{h_2}$  – время, которое соответствует началу накопления слоя газа и слоя композитных пузырьков, располагающегося между слоями газа и нефти.

Для удобства численных расчетов приведем уравнения (1), (2), (4), (5) к следующему виду:

$$\frac{dM_g}{dt} = \begin{cases} \rho_g Q_g^e, & t < t^* \\ 0, & t \geq t^* \end{cases}, \quad \frac{dM_o}{dt} = \begin{cases} \rho_o Q_o^e, & t < t^* \\ 0, & t \geq t^* \end{cases},$$

$$\frac{dM_{h_1}}{dt} = \begin{cases} \rho_{com} Q_g, & \rho_{com} > \rho_o \\ 0, & \rho_{com} < \rho_o \end{cases},$$

$$\frac{dM_{h_2}}{dt} = \begin{cases} \rho_{com} Q_g, & \rho_{com} < \rho_o \\ 0, & \rho_{com} > \rho_o \end{cases}, (8)$$

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{1}{c_o M_o} [-S_d q_{oh_1} - S_d q_{oh_2} + c_o m_o^+ (T_o^+ - T_o)], (9)$$

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{c_g M_g} [-S_d q_{gh_2} + c_g m_g^+ (T_g^+ - T_g)]. (10)$$

Начальные условия:

$$Q_g^+ = Q_g^e, \quad Q_g^- = Q_g^e, \quad Q_o^+ = Q_o^e, \quad Q_o^- = Q_o^e, \quad S_d = \pi R^2,$$

$$T_o^+ = T(z_{h_1w}), \quad T_g^+ = T(z_{h_1w}).$$

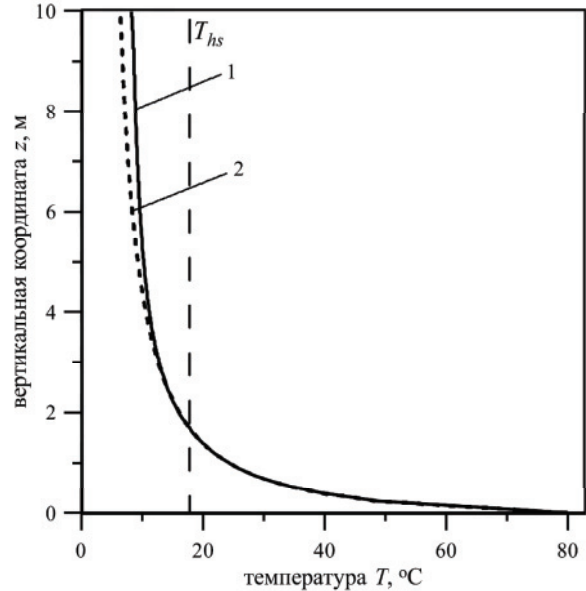


Рис. 2. Зависимость температуры контрольного объема от вертикальной координаты в случае, когда гидратообразование лимитируется теплообменом (1) и диффузией (2), вертикальная линия соответствует равновесной температуре гидратообразования [16]. При расчетах используем кривую 1

Fig. 2. Dependence of the control volume (CV) temperature on vertical coordinate in the case when hydrate formation is limited by heat exchange (1) and diffusion (2), the vertical line corresponds to the equilibrium temperature of hydrate formation [16]. When calculating, use curve 1

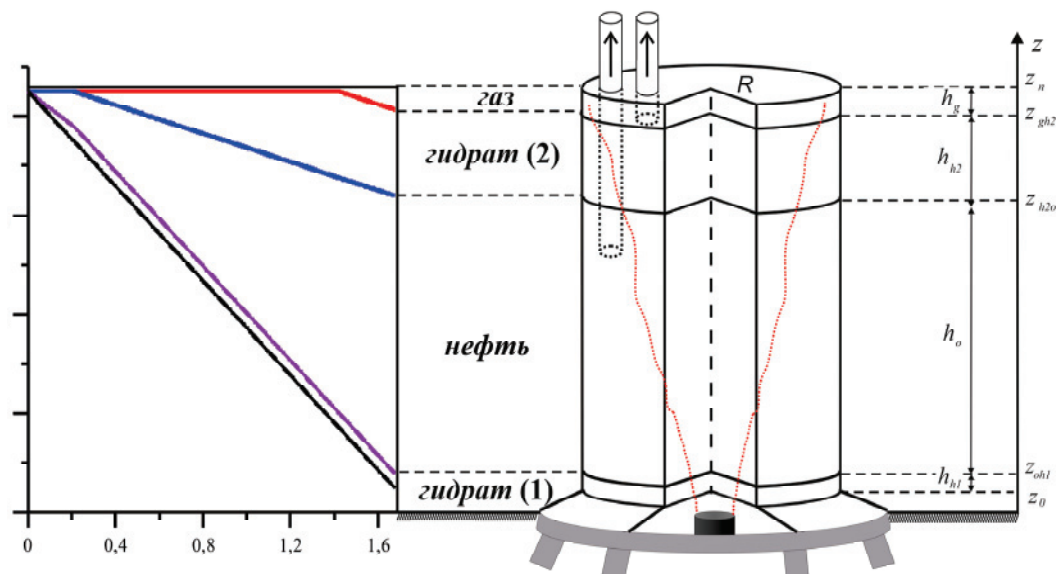


Рис. 3. Зависимость координат, разделяющих слои углеводородов внутри купола, от времени

Fig. 3. Time dependence of the coordinates separating the hydrocarbon layers inside the dome

Зависимость температуры струи от вертикальной координаты была определена в работе [16] и приведена на рис. 3. Для определения температур  $T_o^+$  и  $T_g^+$  используем известную температуру струи на высоте, соответствующей координате раздела слоев композитных пузырьков и воды  $z_{h,w}$ . Из уравнения (8) с учетом (3) следуют уравнения для определения координат  $z_{gh2}$ ,  $z_{h2o}$ ,  $z_{oh1}$ ,  $z_{h,w}$ . Уравнения (8)–(10) с учетом (6), (7) и начальных условий решаются численно, методом Эйлера.

#### Результаты расчетов

Параметры системы, которые использовались для расчетов: размеры купола  $R=2$  м,  $H=8$  м, координата нижнего основания купола  $z_0=0,5$  м,  $r=0,1$  м,  $Q_o^e=0,7$  м<sup>3</sup>/с и  $Q_g^e=0,3$  м<sup>3</sup>/с,  $T_w=4$  °С,  $T^e=80$  °С,  $p=15$  МПа,  $c_o=2090$  Дж/(кг·К),  $c_g=2365$  Дж/(кг·К),  $c_h=2100$  Дж/(кг·К),  $c_w=4200$  Дж/(кг·К),  $\rho_w=1030$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_o=650$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_g=99,25$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_h=910$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_w=0,58$  Вт/(м·К),  $\lambda_g=0,45$  Вт/(м·К),  $\lambda_o=0,12$  Вт/(м·К),  $\mu_w=1,57 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $L=5 \cdot 10^5$  Дж/кг.

На рис. 3 представлена зависимость координат, разделяющих слои углеводородов внутри купола от времени. Видно, что с течением времени координаты раздела соответствующих слоев убывают, что связано с процессом накопления газа, композитных пузырьков и нефти в куполе. Процесс продолжается до полного заполнения купола углеводородами. Внутри купола появились две области, в которых накоплен гидрат. Каждая область насыщена композитными пузырьками соответствующей плотности.

На рис. 4 представлены зависимости толщин слоев нефти, газа и гидрата от вертикальной координаты. Наибольшая толщина накоплена у слоя нефти, что связано с начальным значением объемного расхода поступающей из скважины нефти.

Вследствие гидратообразования на поверхности пузырьков и заполнения купола сверху вниз сначала накапливается слой композитных пузырьков с плотностью  $\rho_{com} > \rho_o$ , затем плотность пузырьков становится меньше и накапливаются композитные пузырьки с плотностью  $\rho_{com} < \rho_o$ , после чего начинает накапливаться газ.

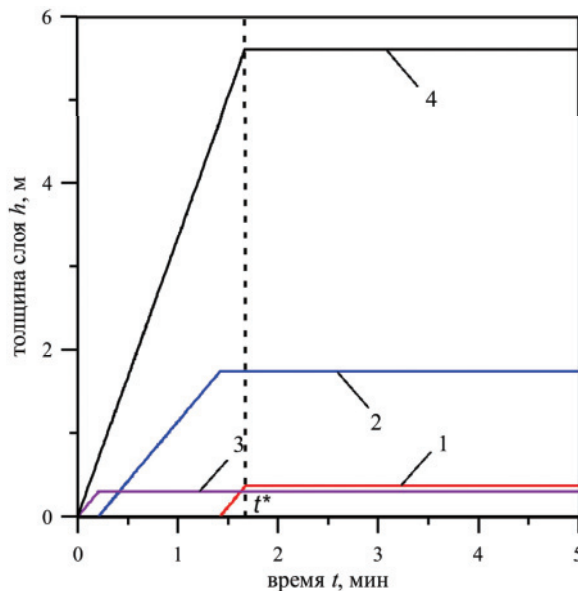


Рис. 4. Зависимость толщин слоев в куполе,  $t^*$  – время начала откачивания углеводородов из купола. Цифрами обозначены: 1 – газ, 2 – гидрат между слоями газа и нефти, 3 – гидрат между слоями нефти и воды, 4 – нефть

Fig. 4. Dependence of the thickness of the layers in the dome. The figures are: 1 – gas, 2 – hydrate between the layers of gas and oil, 3 – hydrate between the layers of oil and water, 4 – oil

На рис. 5 представлена зависимость температур слоев нефти (1), газа (2) и равновесная температура

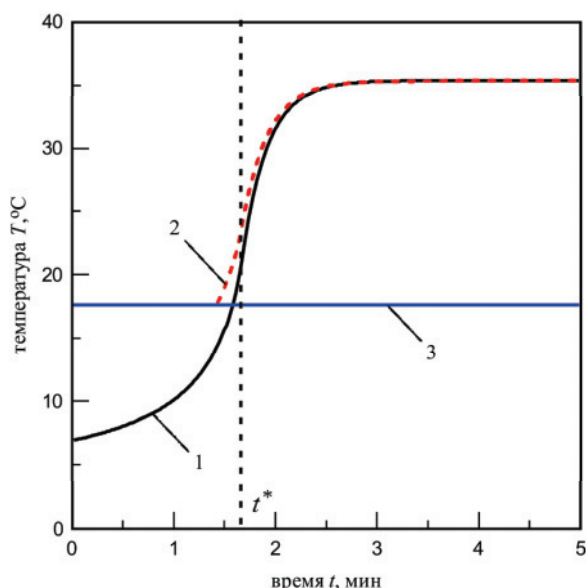


Рис. 5. Зависимость температур слоев нефти (1), газа (2) и равновесной температуры гидратообразования (3) от времени,  $t^*=1,67$  мин

Fig. 5. Dependence of the temperatures of the layers of oil (1) gas (2) and the equilibrium temperature of hydrate formation (3) on time  $t^*=1,67$  min

тура гидратообразования (3) от времени для этапа накопления углеводородов в куполе. С течением времени температура слоя нефти возрастает и стремится к температуре поступающих из струи капель нефти. Температура слоя газа также стремится к температуре поступающих из струи пузырьков газа. С течением времени температуры слоев газа и нефти стремятся к температуре поступающих из струи нефти и газа  $T=35,5$  °C.

### Заключение

Рассмотрен процесс накопления углеводородов в куполе для случая, когда гидратообразование на поверхности пузырьков метана описывается схемой теплообмена. Когда плотность композитных пузырьков больше плотности нефти, слой гидрата (образованного композитными пузырьками) накапливается между слоями нефти и воды, в случае, когда плотность пузырька меньше плотности нефти, слой гидрата (образованного композитными пузырьками) накапливается между слоями газа и нефти. В результате расчетов определены температурные значения углеводородов, которые накапливаются внутри купола. Установлено, что с течением времени температуры слоев газа и нефти стремятся к температуре поступающих из струи углеводородов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-31-00264 мал. а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хасанов М.К. Численное моделирование закачки углекислого газа в истощенное месторождение углеводородов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 48–54.
- Полетаев А.В., Полетаева Е.В. Оценка объемов углеводородных газов газогидратов Азербайджанского сектора Южного Каспия по сейсмическим данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 153–162.
- Богоявленский В.И., Баринов П.С., Богоявленский И.В. Катастрофа в мексиканском заливе на месторождении Ixtos комплекса Cantarell // Бурение и нефть. – 2018. – № 1. – С. 3–13.
- Зайцев В.И., Карпиков А.В. Средства борьбы с нефтяными загрязнениями на шельфе Северных морей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 6 (101). – С. 48–52.
- Chen F.H., Yapa P.D. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts part ii: comparison of numerical simulations with deepspill field experiments // Journal of Hydraulic Research. – 2003. – V. 41. – № 4. – P. 353–365.
- Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach. – Kluwer, 2003. – 390 p.
- Bishnoi P.R., Maini B.B. Laboratory study of behaviour of oil and gas particles in salt water, relating to deepwater blowouts // Spill Technology Newsletter. – 1979. – V. 4. – № 1. – P. 24–36.
- Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1. – № 3. – С. 92–101.
- Carte G.A. Novel concept to control and remediate deep water oil spills: the universal deepwater oil containment system (UDOC). URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/3649822/universal-deepwater-oil-containment-george-carter-inventions> (дата обращения 26.03.2018).
- Migration of a single gas bubble in water during the formation of stable gas-hydrate crust on its surface / V.S. Shagapov, A.S. Chiglintseva, A.A. Rusinov, B.I. Tazetdinov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2017. – V. 51. – № 2. – P. 216–223.
- Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. Bubble Migration during Hydrate Formation // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2015. – V. 56. – № 2. – P. 202–210.
- Chen F.H., Yapa P.D. Estimating hydrate formation and decomposition of gases released in a deepwater ocean plume // Journal of marine systems. – 2001. – № 30. – P. 21–32.
- Sloan E.D. Clathrate hydrates of natural gases. 2<sup>nd</sup> ed. – New York, Marcel dekker, Inc., 1997. – 750 p.
- Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. About the theory of initial stage of oil accumulation in a dome-separator // Thermophysics and Aeromechanics. – 2015. – V. 22. – № 3. – С. 387–392.
- Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Model of a submerged jet accounting for two limiting schemes of hydrate formation // Thermophysics and Aeromechanics. – 2018. – V. 25. – № 1. – P. 75–83.
- Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. On the theory of accumulation of hydrocarbons in a dome used to eliminate a technogenic spill at the bottom of the ocean // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – V. 91. – № 1. – P. 246–251.
- Davidson M.J., Pun K.L. Weakly advected jets in crossflow // Journal of hydraulic research. – 1999. – V. 125. – № 1. – P. 47–58.

18. Socolofsky S.A., Adams E.E. Multi-phase plumes in uniform and stratified crossflow // *Journal of hydraulic research*. – 2002. – V. 40. – № 6. – P. 661–672.
19. Pun K.L., Davidson M.J. On the behavior of advected plumes and thermals // *Journal of hydraulic research*. – 1999. – V. 37. – № 4. – P. 519–540.
20. Zheng L., Yapa P.D. Simulation of oil spills from underwater accidents II: Model verification // *Journal of hydraulic research*. – 1998. – V. 36. – № 1. – P. 117–134.
21. Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts. P. I: theory and model formulation // *Journal of hydraulic research*. – 2002. – V. 41. – № 4. – P. 339–351.
22. Насыров А.А. Моделирование процесса наполнения «купола-сепаратора», предназначенного для ликвидации нефтегазовых выбросов в зоне морского дна // *Вестник Кемеровского государственного университета*. – 2015. – № 2–1 (62). – С. 41–45.
23. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

*Поступила 17.12.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Кильдибаева С.Р.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

**Гималтдинов И.К.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.



UDC 532.546:536.421

## THEORETICAL MODEL FOR HYDROCARBON ACCUMULATION IN A DOME TAKING INTO ACCOUNT CONDENSATION, LIMITED BY HEAT TRANSFER

Svetlana R. Kildibaeva<sup>1</sup>,

freya.13@mail.ru

Ilyas K. Gimaltdinov<sup>2</sup>,

iljas\_g@mail.ru

<sup>1</sup> Sterlitamak Branch of Bashkir State University,  
49, Lenin Avenue, Sterlitamak, 453100, Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Oil Technical University,  
1, Cosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**The relevance** of the research is related to the increase in the scale of hydrocarbon production in the offshore zone of the world ocean and the associated risks of accidental spills of hydrocarbons. In this regard, it is necessary to study the mathematical model of the dome, designed to eliminate deep-sea leaks. According to the formulation of the problem, the thermophysical characteristics of the environment correspond to the conditions of stable existence of hydrate. To describe hydrate formation on the surface of methane bubbles, a limit scheme is proposed, according to which hydrate formation is limited by heat exchange. In earlier works, the accumulation of hydrocarbons was considered, taking into account the hydrate formation limited by diffusion, which is another limiting case of describing hydrate formation.

**The main aim** of the research is to study the features of hydrocarbon accumulation (oil, gas, hydrate) in the dome for the case when hydrate formation is limited by heat exchange with the environment.

**Object** of research is a stream of hydrocarbons consisting of water, oil droplets, gas bubbles and composite bubbles, which leads to the accumulation of hydrocarbons in the dome when gets into it. The thermophysical characteristics of the environment correspond to the conditions of stable existence of hydrate.

**Methods.** The mathematical model of hydrocarbon accumulation in the dome is constructed. For describing heat and mass transfer the authors have used the system of equations that includes conservation laws for mass of gas, oil and hydrate, equation of energy conservation for the layers of gas and oil, as well as auxiliary equations for calculating heat flows.

**Result.** The paper considers the process of hydrocarbon accumulation in the dome in the case when hydrate formation on the surface of methane bubbles is limited by heat exchange. When the density of the composite bubbles greater than the that of oil, a layer of hydrate (formed composite bubbles) is accumulated between the layers of oil and water; in the case when the density of the bubble is less than that of oil, a layer of hydrate (formed composite bubbles) is accumulated between the layers of oil and gas. The authors determined the temperature field for hydrocarbons accumulated inside the dome. Over time, the temperature of the layers of gas and oil tend to temperature of oil and gas coming from the jet.

### Key words:

Dome, hydrocarbon spill, shelf, oil, hydrate formation.

*The research was supported by the grant of the Russian Fund of Fundamental Research (grant no. 18–31–00264 мол\_a).*

### REFERENCES

1. Khasanov M.K. Numerical simulation of carbon dioxide injection into a depleted hydrocarbon field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 48–54. In Rus.
2. Poletaev A.V., Poletaeva E.V. Estimation of volumes of hydrocarbon gases of gas hydrates of the Azerbaijan sector of the South Caspian sea by seismic data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 153–162. In Rus.
3. Bogoyavlensky V.I., Barinov P.S., Bogoyavlensky I.V. Disaster in the Gulf of Mexico at the Ixtoc Deposit of the Cantarell complex. *Burenie i neft*, 2018, no. 1, pp. 3–13. In Rus.
4. Zaytsev V.I., Karpikov A.V. Means of oil pollution control on the shelf of the Northern seas. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 6 (101), pp. 48–52. In Rus.
5. Chen F.H., Yapa P.D. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts part ii: comparison of numerical simulations with deepspill field experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, vol. 41, no. 4, pp. 353–365.
6. Lee J.H.W., Chu V.H. *Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach*. Kluwer, 2003. 390 p.
7. Bishnoi P.R., Maini B.B. Laboratory study of behaviour of oil and gas particles in salt water, relating to deepwater blowouts. *Spill Technology Newsletter*, 1979, vol. 4, no. 1, pp. 24–36.
8. Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Dynamics of multiphase submerged jet taking into account hydrate formation. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovaniye. Neft, gaz, energetika*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 92–101. In Rus.
9. Carte G.A. *Novel concept to control and remediate deep water oil spills: the universal deepwater oil containment system (UDOC)*. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/3649822/universal-deepwater-oil-containment-george-carter-inventions> (accessed: 18 March 2018).
10. Shagapov V.S., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A., Tazetdinov B.I. Migration of a single gas bubble in water during the formation of stable gas-hydrate crust on its surface. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 2, pp. 216–223.
11. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. Bubble Migration during Hydrate Formation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 202–210.
12. Chen F.H., Yapa P.D. Estimating hydrate formation and decomposition of gases released in a deepwater ocean plume. *Journal of marine systems*, 2001, no. 30, pp. 21–32.

13. Sloan E.D. *Clathrate hydrates of natural gases*. 2<sup>d</sup> ed. New York, Marcel dekker, Inc, 1997. 750 p.
14. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. About the theory of initial stage of oil accumulation in a dome-separator. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 387–392.
15. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Model of a submerged jet accounting for two limiting schemes of hydrate formation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 75–83.
16. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. On the theory of accumulation of hydrocarbons in a dome used to eliminate a technogenic spill at the bottom of the ocean. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 1, pp. 246–251.
17. Davidson M.J., Pun K.L. Weakly advected jets in crossflow. *Journal of hydraulic research*, 1999, vol. 125, no. 1, pp. 47–58.
18. Socolofsky S.A., Adams E.E. Multi-phase plumes in uniform and stratified crossflow. *Journal of hydraulic research*, 2002, vol. 40, no. 6, pp. 661–672.
19. Pun K.L., Davidson M.J. On the behavior of advected plumes and thermals. *Journal of hydraulic research*, 1999, vol. 37, no. 4, pp. 519–540.
20. Zheng L., Yapa P.D. Simulation of oil spills from underwater accidents II: Model verification. *Journal of hydraulic research*, 1998, vol. 36, no. 1, pp. 117–134.
21. Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – part I: theory and model formulation. *Journal of hydraulic research*, 2002, vol. 41, no. 4, pp. 339–351.
22. Nasyrov A.A. Modeling of the filling process of the «dome-separator», designed to eliminate oil and gas emissions in the seabed area. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2–1 (62), pp. 41–45. In Rus.
23. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Heat conduction theory]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1967. 600 p.

Received: 17 December 2018.

#### Information about the authors

**Svetlana R. Kildibaeva**, Cand. Sc., associate professor, Sterlitamak Branch of Bashkir State University.

**Ilyas K. Gimaltdinov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Oil Technical University.

УДК 624.131

## ОПЫТ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ ПРОМПЛОЩАДКИ ЭЛЬГИНСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА В ЯКУТИИ

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

Дмитриева София Алексеевна<sup>1</sup>,  
dmitrieva\_sa93@mail.ru

Осьмушкина Наталья Викторовна<sup>2</sup>,  
yjtisiz@nery.sakha.ru

Осьмушкин Андрей Владимирович<sup>2</sup>,  
yjtisiz@nery.sakha.ru

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

<sup>2</sup> ООО «Нерюнгростройизыскания»,  
Россия, 678960, Якутия, г. Нерюнгри, ул. ЯкутТисиз, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена стремительным ростом геологоразведочной и производственной деятельности в районах вечной мерзлоты в России за последние сорок лет. В статье приведена характеристика грунтов промплощадки Эльгинского горно-обогатительного комбината в Республике Саха (Якутия) по несущей способности. Инженерно-геологическая оценка территории необходима для того, чтобы поддерживать процесс принятия решений по размещению сооружений, а также для того, чтобы строительство объектов осуществлялось с меньшим отрицательным воздействием на окружающую среду, сопровождалось снижением опасности и ущерба как для строительства, так и в целом для общества и экономики.

**Целью** данного исследования является описание инженерно-геологических и гидрогеологических условий промплощадки, экзогенных геологических процессов, которые могут быть актуальны для установления пригодности территории к застройке.

**Объектом** исследования является геологическая среда промплощадки горно-обогатительного комбината. Рассмотрены основные природные компоненты, влияющие на планирование и развитие землепользования: литологический состав; геоморфологические и тектонические условия; физико-механические свойства пород, гидрологические и мерзлотно-гидрогеологические условия района.

**Методы.** Данное исследование включает в себя краткий обзор соответствующей литературы; анализ информации, полученной из фондов изыскательской компании, определение признаков и методики районирования. Все информационные слои о природной среде обрабатывались, затем объединялись для получения единой инженерно-геологической карты.

**Результаты.** Разработана карта инженерно-геологического районирования по несущей способности. На карте выделены три категории районов с разной степенью благоприятности грунтов исследуемой территории для строительства объектов, такие как благоприятные, приемлемые и неблагоприятные условия.

### Ключевые слова:

Горно-обогатительный комбинат, карьерная добыча, грунт, уголь, геологический процесс, физико-механические свойства, несущая способность, районирование.

### Введение

Стремительный рост геологоразведочной и производственной деятельности в районах вечной мерзлоты в России повысил значимость инженерно-геологической оценки этих территорий. В работах уральской школы инженеров-геологов [1–3] уделено внимание описанию инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых Урала и сопредельных областей.

Работы томской школы инженеров-геологов [4–8] посвящены изучению закономерностей формирования инженерно-геологических условий угольных месторождений Сибири и Дальнего Востока, оценке устойчивости бортов угольных карьеров в Кузбассе и Восточной Сибири.

Многочисленные исследования направлены на изучение влияния горных работ на поверхностные и подземные воды [9–13], оценку состояния окружающей среды с помощью ГИС-технологий [14–16].

В течении последних десяти лет появились работы по исследованию Эльгинского угольного месторождения. Так, в работах [17–19] выполнена оценка трещиноватости коренных пород до глубины 250 м, их физико-механических свойств, устойчивости в бортах карьеров. Е.А. Хоктянов оценивает зольность углей Эльгинского месторождения [19]. Оценка факторов техногенного воздействия на природную среду района (поверхностные воды, атмосферу) рассмотрена в работах [20, 21].

Технология инженерно-геологического районирования подробно изложена в работах [22–27]. Этот метод позволяет решать много задач по планированию землепользования, поэтому давно и широко используется в мире.

Целью данного исследования является описание инженерно-геологических и гидрогеологических условий промплощадки, экзогенных геологических процессов, которые могут быть актуальны

для установления пригодности территории к застройке. Для этого необходимо рассмотреть основные природные компоненты геологической среды, влияющие на планирование и развитие землепользования: литология; топография; сейсмотектоника; геотехника; гидрология, гидрогеология и вечная мерзлота.

#### Характеристика инженерно-геологических условий

Территория Эльгинского месторождения в инженерно-геологическом отношении изучена довольно подробно в последние годы [28–30].

По административному делению район работ расположен в Нерюнгринском районе Республики Саха (Якутия), в 400 км от г. Нерюнгри на восток. В районе проектируемых работ постоянно живущее население отсутствует. Единственным населенным пунктом является поселок Эльга – бывшая база Эльгинской геологоразведочной партии.

Площадь расположена на юго-восточной окраине Алданского нагорья, в пределах Токинской впадины, являющейся составной частью Южно-Якутского каменноугольного бассейна. Токинская впадина ограничена с юга Становым, а с севера Учуро-Идюмским хребтами. Непосредственными границами Эльгинского месторождения являются: восточной – р. Укиkit, южной – крупноамплитудное нарушение северо-западного простирания, западной – р. Ундыткан, северной – условная линия, соединяющая р. Ундыткан с р. Эльга в среднем их течении.



Рис. 1. Местоположение изучаемой площадки

Fig. 1. Location of the study area

В геоморфологическом отношении промплощадка расположена в долинах реки Укиkit и ее правого притока ручья Безымянный, на склонах различной крутизны пологоступенчатого водораздела. Отметки поверхности колеблются от 936 до 1029 м, перепад высот составляет 93 м.

Микрорельеф ровный, мелкобугристый и бугристый, осложнен ложбинами округлой и вытянутой формы, а также наличием на поверхности задернованных или открытых выходов песчаника. Растительность представлена редким лиственничным лесом, редким кедровым стлаником, сменяю-

щимся густым на склонах средней крутизны и крутых. Отмечаются «пятна» березняка, повсеместно – багульник, голубичник. В долине – тальник и ерник. Покров в основном моховой, мохово-брусничной, мохово-травяной.

В геологическом строении площадки принимают участие верхнеюрские отложения нерюнгриканской свиты ( $J_3nr$ ), перекрытые с поверхности верхнечетвертичными и современными отложениями озерно-болотного ( $lbQ_{III-IV}$ ), аллювиального ( $aQ_{III-IV}$ ) и элювиально-делювиального ( $edQ_{III-IV}$ ) генезисов [29,30].

Верхнечетвертичные и современные отложения озерно-болотного генезиса ( $lbQ_{III-IV}$ ) имеют повсеместное распространение по площади, с мощностью до 0,4...1,8 м. Отложения представлены слабо-, среднезатрощенными песками пылеватыми, супесями и суглинками с дресвой, дресвяными, дресвяными и щебенистыми грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем, а также торфом бурым среднеразложившимся.

Верхнечетвертичные и современные отложения аллювиального генезиса ( $aQ_{III-IV}$ ) имеют ограниченное распространение по площади, вскрыты только в долине ручья Безымянный под почвенно-растительным слоем и элювиально-делювиальными отложениями. Отложения представлены песками, супесями и суглинками с гравием, гравелистыми, галечниковыми и гравийными грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем, мощностью 0,5...10,2 м. Обломочный материал представлен осадочными, магматическими и метаморфическими породами, плохой, средней и хорошей степени окатанности.

Верхнечетвертичные и современные отложения элювиально-делювиального генезиса ( $edQ_{III-IV}$ ) имеют повсеместное распространение по площади, вскрыты с поверхности мощностью 0,9...3,7 м. Отложения представлены песками пылеватыми, супесями и суглинками с дресвой, дресвяными, а также дресвяными и щебенистыми грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем от 10 до 49 %. Обломочный материал представлен осадочными породами, различной прочности.

Верхнеюрские отложения нерюнгриканской свиты ( $J_3nr$ ) имеют повсеместное распространение, залегают под четвертичными отложениями с глубины 0,5...4 м, вскрытой мощностью 0,5...55,0 м. Породы представлены песчаниками и алевролитами различной прочности с пластами и пропластками углей.

В геокриологическом отношении площадка расположена в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород. Грунты слоя сезонного оттаивания в интервале 0,0...4,0 м находились как в талом, так и в мерзлом состоянии в период полевых работ с апреля по декабрь [30]. Грунты имеют массивную и слоистую криогенную текстуру, при оттаивании: глинистые грунты твердые до текучих, крупнообломочные и песчаные грунты от малой степени водонасыщения до водонасыщенных.



Скальные грунты – в морозном состоянии. Глубина сезонного оттаивания зависит от многих факторов (летняя температура воздуха, растительный и моховой покров, влажность и литологический состав грунтов зоны аэрации и т. п.). На глубине годовых нулевых амплитуд температура изменяется от минус 0,1 до минус 1,5 °С. Нормативная глубина сезонного оттаивания составляет четыре метра.

**Гидрогеологические** условия площадки характеризуются развитием надмерзлотных грунтовых вод, вскрытых в трех шурфах на глубине 1...2 м. Водовмещающими грунтами являются щебенистые, галечниковые грунты с супесчаным заполнителем и алевролиты «рухляки». Питание грунтовых вод происходит в основном за счёт инфильтрации атмосферных осадков и оттаивания сезонно-мёрзлых грунтов, водоупором служат вечномёрзлые грунты. С прекращением питания атмосферными осадками, наступлением отрицательных температур воздуха, перемерзанием русел водотоков надмерзлотный водоносный горизонт истощается, сокращается и к весне в основном прекращает свое существование. В местах отсутствия плотных мерзлых пород вода по трещинам свободно фильтруется вниз, пополняя запасы нижележащего комплекса пород.

По химическому составу вода гидрокарбонатная-натриевая-кальциевая, гидрокарбонатная-натриевая и гидрокарбонатная-кальциевая-натриевая с общей минерализацией 126,66...262,96 мг/л, неагрессивная к бетону, слабоагрессивная к железобетонным конструкциям. Коррозионная активность грунтовых вод по отношению к алюминиевой оболочке кабеля средняя, к свинцу – низкая, средняя и высокая [30].

**Геологические процессы и явления.** Из неблагоприятных процессов и явлений, негативно влияющих на строительство и эксплуатацию сооружений, следует отметить поверхностное заболачивание площадки, морозное выпучивание каменного материала на водораздельных площадках и склонах, морозное пучение рыхлых грунтов при промерзании и наличие в разрезе ослабленных зон по углям, алевролитам и песчаникам «рухлякам» [29].

**Пучение грунтов** чаще всего отмечается в нижних частях склонов и днищ долин, сложенных тонкодисперсными грунтами. В зоне сезонного оттаивания-промерзания в интервале глубин 0...2,5 м заторфованные грунты и торф обладают морозной пучинистостью сильной степени.

**Курумы.** Наиболее широко развиты на пологих склонах. Глыбы размером от 0,2 до 1,0 м открытые или покрыты сверху лишайником. Поражённость территории каменными потоками составляет 5 %. Следует учесть, что курумы являются наиболее опасным из геологических процессов, так как при проведении взрывных работ или подрезки его траншеями возможны подвижки каменных потоков.

**Заболачивание** развивается в пойме Безымянного ручья и на пологих склонах. Заболачивание

преимущественно слабое. Питание происходит за счёт атмосферных осадков и надмерзлотных вод. Торф чаще слаборазложившийся, в целом заболоченные участки занимают значительную часть площадки.

**Состав и свойства грунтов.** В 2009–2010 гг. на площадке пробурено 230 скважин глубиной до 3...60 м с отбором проб грунтов для определения физико-механических свойств. В результате статистической обработки данных о геологическом строении участка, литологических особенностях грунтов, в пределах промплощадки выделено 2 слоя и 27 инженерно-геологических элементов (ИГЭ) [29, 30].

В связи с тем, что некоторые грунты находятся в идентичных условиях, имеют близкие показатели физико-механических свойств, они объединены в один инженерно-геологический элемент, например:

- песок пылеватый, суглинок с дресвой, супесь с дресвой и супесь слабо-, среднезаторфованные – в ИГЭ-2 (суглинок заторфованный);
- супесь и суглинок дресвяные, супесь и суглинок гравелистые, с включением гравия, дресвяный и щебенистый грунт с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем слабо-, среднезаторфованные – в ИГЭ-3 (заторфованный грунт);
- дресвяный грунт с песчаным, суглинистым заполнителем и щебенистые грунты с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем – в ИГЭ-7 (дресвяный грунт с супесчаным заполнителем);
- гравийный грунт с песчаным и супесчаным заполнителем – в ИГЭ-13 (галечниковый грунт с супесчаным заполнителем) [30].

Нормативные показатели физико-механических свойств выделенных ИГЭ приведены в табл. 1, 2. Грунты не засолены, обладают средней и низкой степенью коррозионной активности по отношению к стали, средней и высокой – к свинцу и высокой – к алюминиевой оболочке.

**Слой 1 Почвенно-растительный** в отдельный элемент не выделен ввиду маломощности (0,1...0,4 м). При производстве работ он подлежит полному удалению с последующим использованием для целей рекультивации земель.

**Слой 2 Лед** мутный, мутно-коричневый с песком. Вскрыт локально скважинами № 64, 65, 73, 218 с глубины 0,8...2,4 м, мощностью 0,8...3,6 м. В отдельный элемент не выделен ввиду того, что при производстве работ он подлежит полному удалению из работы оснований зданий и сооружений.

**ИГЭ-1 Торф** буро-коричневый, бурый, коричневый, имеет ограниченное распространение по площади, вскрыт с поверхности, с мощностью 0,3...1,2 м. При промерзании грунт обладает пучинистыми свойствами.

**ИГЭ-2 Суглинок заторфованный** бурый, коричневый, серо-коричневый, темно-серый, с включениями дресвы песчаников до 2...23 %, имеет ло-

Таблица 1. Нормативные значения физико-механических свойств грунтов  
 Table 1. Average values of physical and mechanical properties of soils

Номер ИГЭ/Soil unit number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9м	10	12	13	13м	14	14м	17	17м	18	18м	19	19м
Количество проб/Number of samples	10	25	23	24	31	15	65	57	11	10	15	10	11	11	10	19	26	262	17	31	10	20
Суммарная влажность, $w_{\text{ср}}$ , д.е. Total water content	1,87	0,33	0,25	0,2	0,14	0,21	0,13	0,14	0,21	0,16	0,19	0,24	0,14	0,14	0,13	0,15	0,11	0,11	0,15	0,1	0,1	0,06
Влажность заполнения, д.е. Water content of the filler	–	0,34	0,47	0,22	0,21	0,23	0,28	–	0,29	0,21	0,2	0,39	0,27	0,32	–	–	0,18	0,2	0,26	0,2	–	–
Суммарная льдистость, $i_{\text{ср}}$ , д.е. Total volume content of ice	2,57	0,34	0,3	0,3	0,17	0,23	0,19	0,24	0,29	0,22	0,39	0,48	0,24	0,19	0,22	0,2	0,16	0,15	0,08	0,14	0,17	0,11
Льдистость видимых включений, д.е. $i_i$ Volume content of ice at the expense of ice prolayers	0,35	0,11	0,07	0,06	0,04	0,05	0,06	0,1	0,07	0,06	0,08	0,15	0,05	0,03	0,04	0,03	0,02	0,05	0,02	0,03	0,04	0,02
Влажность на границе текучести $W_L$ , д.е. Liquid limit	–	0,36	0,33	0,26	0,25	0,3	0,25	0,27	0,26	0,24	–	–	0,22	0,21	0,22	0,23	0,28	0,27	0,36	0,36	–	–
Влажность на границе раскатывания, $W_p$ , д.е. Plastic limit	–	0,27	0,25	0,2	0,19	0,2	0,19	0,21	0,2	0,18	–	–	0,17	0,16	0,16	0,17	0,21	0,21	0,26	0,24	–	–
Число пластичности, $I_p$ , д.е. Plasticity index	–	0,09	0,08	0,06	0,06	0,1	0,06	0,06	0,06	0,06	–	–	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,1	0,12	–	–
Консистенция, $I_L$ , д.е. Liquidity index	–	0,79	>1	0,39	0,22	0,23	>1	<0	>1	0,58	–	–	>1	>1	–	–	<0	>1	<0	–0,37	–	–
Плотность частиц грунта, $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> Solid particles density	1,67	2,54	2,6	2,67	2,69	2,69	2,68	2,67	2,66	2,65	2,69	2,67	2,66	2,65	2,66	2,63	2,71	2,67	2,74	2,69	1,71	1,58
Плотность грунта, $\rho$ , г/см <sup>3</sup> /Soil density	1,24	1,62	1,89	1,87	1,98	1,85	2,03	2,07	1,95	2,07	1,86	1,99	2,07	2,12	2,19	2,14	2,07	2,1	2,08	2,06	1,4	1,39
Плотность скелета грунта, $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> Dry soil density	0,48	1,22	1,51	1,54	1,74	1,53	1,79	1,8	1,57	1,71	1,55	1,47	1,69	1,6	1,95	1,88	1,86	1,9	1,83	1,87	1,26	1,3
Пористость/Porosity, %	71,11	52,11	41,79	42,22	35,21	43,26	33,19	32,41	41,05	35,5	42,17	44,82	36,57	39,8	26,75	28,39	31,09	28,69	33,11	30,51	26,36	17,74
Коэффициент пористости/Void ratio	2,46	1,09	0,72	0,73	0,54	0,76	0,5	0,48	0,7	0,55	0,73	0,81	0,58	0,66	0,37	0,4	0,45	0,4	0,5	0,44	0,36	0,22
Коэффициент водонасыщения $S_r$ , д.е. Degree of saturation	1,27	0,76	0,89	0,74	0,72	0,73	0,68	0,76	0,8	0,77	0,71	0,79	0,66	0,55	0,92	1	0,68	0,7	0,8	0,62	0,49	0,43
Расчётная удельная сила морозного пучения, МПа Calculated specific force of frost heaving, MPa	0,09*	0,09*	0,09*	0,07*	0,07*	0,05*	0,07*	0,05*	0,09*	0,09*	0,05*	0,07*	0,07*	0,07*	0,05*	0,05*	–	–	–	–	–	–
Расчётное сопротивление основания, МПа Calculated soil resistance	–	0,10**	0,18**	0,23**	0,30**	0,20**	0,35**	0,60**	0,20**	0,30**	0,15**	0,50**	0,40**	0,40**	0,60**	0,60**	0,40**	0,35**	0,40**	0,35**	–	–
Угол внутреннего трения, $\varphi$ , град Angle of friction (degree)	–	–	–	21**	26**	23**	41**	41**	21**	26**	26**	–	38**	38**	43**	43**	43**	43**	43**	43**	24'	24'
Сцепление, кПа/Cohesion, kPa	–	–	–	11**	15**	25**	1**	1**	11**	15**	2**	–	–	–	2**	2**	2**	2**	2**	2**	27'	27'
Коэффициент оттаивания, $A_{\text{от}}$ , д.е. Thawing coefficient	–	0,221"	–	0,129"	–	–	–	0,003***	–	–	–	–	–	–	–	–	0,005***	0,005***	–	–	–	–

Окончание табл. 1  
Table 1

Номер ИГЭ/Soil unit number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9м	10	12	13	13м	14	14м	17	17м	18	18м	19	19м
Коэффициент сжимаемости Coefficient of volume compressibility	–	0,201**	–	0,189**	–	–	–	0,0363***	–	–	–	–	–	–	–	–	0,0328***	0,0328***	–	–	–	–
Модуль деформации, Е, МПа Deformation modulus, MPa	–	3,12**	–	3,68**	24**	17**	45**	22,7***	10**	24**	11**	–	30**	30**	50**	50**	25,7***	25,7***	50**	50**	11'	11'
Относительная осадка S при нагрузке 0,2 МПа, в д.е. Relative deformation S at a load of 0,2 MPa	0,692	0,106	0,088	0,071	0,02	0,054	0,012	0,013	0,043	0,026	0,027	0,036	0,01	0,01	0,01	0,013	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01
Коэффициент теплопроводности талого грунта, ккал/м·град Thermal conductivity of the thawed soil, kilocalories/m·hr-degree	0,80*	–	–	1,40*	1,25*	1,15*	1,70*	1,95*	1,40*	1,45*	1,85*	1,65*	1,55*	1,55*	2,35*	1,95*	1,70*	1,70*	1,95*	1,70*	0,95*	0,65*
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, ккал/м·град Thermal conductivity of the frozen soil, kilocalories/m·hr-degree	1,20*	–	–	1,50*	1,35*	1,30*	1,90*	2,25*	1,50*	1,55*	2,05*	1,85*	1,75*	1,75*	2,50*	2,25*	1,90*	1,90*	2,25*	1,90*	1,10*	0,70*
Объёмная теплоёмкость талого грунта, ккал/м³·град Volumetric heat capacity of the thawed soil, kilocalories/m³·degree	900*	740*	660*	670*	590*	670*	575*	600*	670*	600*	670*	660*	590*	590*	640*	600*	575*	575*	600*	575*	450*	380*
Объёмная теплоёмкость мерзлого грунта, ккал/м³·град Volumetric heat capacity of the frozen soil, kilocalories/m³·degree	650*	505*	490*	510*	480*	510*	485*	540*	510*	540*	510*	490*	480*	480*	540*	540*	485*	485*	540*	485*	415*	350*

Примечание: 1,15\* – значения, принятые в соответствии со СП 25.13330.2012; 0,45\*\* – значения, принятые в соответствии со СП 22.13330.2016; 0,189\* – значения приведены с площадки очистных сооружений и пудов-отстойников; 26,1\*\*\* – значения приведены по результатам испытания грунтов на деформацию методом горячего штампа; 24' – значения приняты по материалам изысканий прошлых лет [29].

Note: 1,15\* are the values taken in accordance with SP 25.13330.2012; 0,45\*\* are the values taken in accordance with SP 22.13330.2016; 0,189\* – the values are given from the site of treatment facilities and ponds; 26,1\*\*\* – the values are given based on the results of soil deformation testing by the hot stamp method; 24' – the values are taken from the materials of surveys of previous years [29, 30].

кальное распространение по площади, вскрыт под почвенно-растительным слоем, мощностью 0,5...3,5 м.

**ИГЭ-3 Затопфованный грунт** темно-серый, коричневатый, желто-коричневый, имеет локальное распространение по площади, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 2,1 м, мощностью 0,2...2,4 м.

**ИГЭ-4 Супесь с дресвой** от 1 до 25 %, темно-серая, серая, темно-коричневая. Грунт имеет локальное распространение по площади, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 0,5...1,1 м, мощностью 0,3...4,0 м.

**ИГЭ-5 Супесь дресвяная** коричневатая-серая, серо-зеленая, желто-коричневая. Грунт имеет ограниченное распространение по площади, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 0,4...2,0 м, мощностью 0,6...3,5 м.

**ИГЭ-6 Суглинок с дресвой** от 4 до 24 %, коричневый, светло-коричневый, зеленоватый-серый, имеет локальное распространение по площади, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 0,5...1,3 м, мощностью 1,2...2,5 м.

**ИГЭ-7 Дресвяный грунт с супесчаным заполнителем** до 30...48 %, имеет повсеместное распространение по площади, вскрыт как с поверхности под почвенно-растительным слоем, так и с глубины 0,5...2,4 м, мощностью 0,8–2,8 м.

**ИГЭ-8 Щебенистый грунт** с супесчаным, суглинистым и песчаным заполнителем до 11–39 %, имеет повсеместное распространение по площади, вскрыт как с поверхности под почвенно-растительным слоем, так и с глубины 0,6...2,5 м, мощностью 0,5...3,4 м.

**ИГЭ-9 Супесь гравелистая** от серовато-коричневого до темно-серого цвета. Грунт имеет ограниченное распространение по площади, вскрыт под почвенно-растительным слоем и с глубины 0,5...1,6 м, мощностью 0,9...3,5 м.

**ИГЭ-9м Супесь гравелистая твердомерзлая** коричневого цвета, имеет локальное распространение по площади, вскрыта с глубины 2,5...3,5 м, мощностью 1,7...5,7 м.

**ИГЭ-10 Песок пылеватый** от желто-коричневого до темно-серого цвета, с включением гравия до 3–20 %. Грунт имеет ограниченное распространение по площади. Вскрыт под почвенно-растительным слоем и с глубины 0,8...3,2 м, мощностью 0,8...2,5 м.

**ИГЭ-12 Песок гравелистый** серо-коричневый, коричневый, имеет ограниченное распространение по площади, вскрыт под почвенно-растительным слоем и с глубины 1,8 м, мощностью 0,8...1,8 м.

**ИГЭ-13 Галечниковый грунт с супесчаным заполнителем** до 30–49 % коричневого и коричневатого-серого цвета. Грунт имеет локальное распространение по площадке, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 0,8...1,9 м, мощностью 0,5...4,0 м.

**ИГЭ-13м Галечниковый грунт с супесчаным заполнителем твердомерзлый.** Заполнитель ко-

ричевато-серого и коричневого цвета до 31...49 %. Грунт имеет локальное распространение по площади, вскрыт с глубины 2,0...4,0 м, вскрытой мощностью 1,5...6,0 м.

**ИГЭ-14 Галечниковый грунт** с супесчаным и песчаным заполнителем до 18...28 % серо-коричневого и коричневого цвета. Грунт имеет локальное распространение по площадке, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 0,8...2,0 м, мощностью 1,3...3,8 м.

**ИГЭ-14м Галечниковый грунт твердомерзлый** с супесчаным и песчаным заполнителем до 13...28 % серо-коричневого и коричневого цвета. Грунт имеет локальное распространение по площадке, вскрыт с глубины 2,0...5,2 м, вскрытой мощностью 0,7...9,1 м.

**ИГЭ-17 Песчаник «рухляк»** коричневатого-серого, серого, желтовато-коричневого и коричневого цвета, сильновыветрелый до щебня, дресвы, супеси и песка. Грунт вскрыт локально, в основном в кровле скального массива с глубины 1,0...15,6 м, вскрытой мощностью 0,5...3,0 м.

**ИГЭ-17м Песчаник «рухляк» твердомерзлый** коричневатого-серого, серого, желтовато-коричневого и коричневого цвета, сильновыветрелый до щебня, дресвы, супеси и песка. Грунт вскрыт локально с глубины 2,2...15,6 м, вскрытой мощностью 0,7...5,6 м.

**Таблица 2.** Нормативные значения физико-механических свойств скальных грунтов

**Table 2.** Average values of physical and mechanical properties of rocks

№ ИГЭ Number of soil unit	Наименование ИГЭ Name of soil unit	Количество проб Number of samples	Плотность, г/см³ Density, g/cm³	Водопоглощение, д.е. Water absorption, decimal	Временное сопротивление сжатию, МПа Strength in uniaxial compression, MPa		Коэффициент размягчаемости Softening ratio
					в сухом состоянии dry	в водонасыщенном состоянии wet	
20м	Песчаник малопрочный Low strength sandstone	34	2,52	0,020	30,0	12,2	0,44
21м	Песчаник средней прочности Medium strength sandstone	488	2,55	0,015	57,8	33,1	0,57
22м	Песчаник прочный High strength sandstone	240	2,61	0,011	102,5	68,4	0,67
23м	Алеврит средней прочности Medium strength siltstone	14	2,59	0,015	65,8	38,6	0,59
24м	Алеврит малопрочный Low strength siltstone	18	2,55	0,018	20,5	9,8	0,48



**ИГЭ-18 Алевролит «рухляк»** темно-серого, коричневого, зеленовато-коричневого цвета. Грунт сильновыветрелый до щебня, дресвы, супеси и суглинка, вскрыт локально с глубины 0,8...3,5 м, мощностью 0,3...5,5 м (рис. 2).



Рис. 2. Керн угля с линзами алевролита рухляка [30]

Fig. 2. Core sample of coal with lenses of siltstone marl [30]

**ИГЭ-18м Алевролит «рухляк» твердомерзлый** темно-серого, коричневого, зеленовато-коричневого цвета. Грунт сильновыветрелый до щебня, дресвы, супеси и суглинка. Вскрыт локально с глубины 3,2...15,0 м, вскрытой мощностью 0,2...4,6 м.

**ИГЭ-19 Уголь** черный, блестящий, выветрелый, с прослойками черного углистого алевролита вскрыт локально по площади в толще песчаников и алевролитов с глубины 0,3...3,8 м, вертикальной мощностью 0,3...1,8 м. Залегание пород моноклиналное с пологими (5°) углами падения на юго-запад.

**ИГЭ-19м Уголь твердомерзлый** черный, блестящий, выветрелый, с прослойками черного углистого алевролита, вскрыт локально по площади в толще песчаников и алевролитов с глубины 3,8...33,7 м, вертикальной мощностью 0,2...1,4 м.

**ИГЭ-20м Песчаник малопрочный** серого, серо-коричневого, желто-коричневого и темно-серого цвета, тонко-мелкозернистый, очень сильнотрещиноватый, трещины ориентированы хаотично и под углами 0...15, 40...55 и 80...85° к оси керна. Грунт вскрыт практически повсеместно по площади с глубины 1,3...37,7 м, вскрытой мощностью 0,4...22,3 м.

**ИГЭ-21м Песчаник средней прочности** серого, серо-зеленого, серо-коричневого цвета, тонко-мелкозернистый, с маломощными прослойками алевролита и угля. Грунт очень сильнотрещиноватый до трещиноватого, трещины ориентированы хаотично и под углами 0...15, 40...55 и 80...85° к оси керна. Грунт вскрыт повсеместно по площади с глубины 0,3...34,0 м, вскрытой мощностью 0,4...38,0 м.

**ИГЭ-22м Песчаник прочный** серого, серо-зеленого, серо-коричневого цвета, тонко-мелкозерни-

стый, с маломощными прослойками алевролита и угля. Грунт очень сильнотрещиноватый до трещиноватого, трещины ориентированы хаотично и под углами 0...15, 40...55 и 80...85° к оси керна. Грунт вскрыт повсеместно по площади с глубины 1,7...56,0 м, вскрытой мощностью 1,3...26,2 м.

**ИГЭ-23м Алевролит средней прочности** серый и темно-серый, тонкозернистый, с маломощными углистыми прослойками, сильнотрещиноватый и очень сильнотрещиноватый, трещины ориентированы хаотично и под углами 0...15, 40...55 и 80...85° к оси керна. Грунт вскрыт локально по площади с глубины 2,0...27,5 м, вскрытой мощностью 0,7...5,5 м.

**ИГЭ-24м Алевролит малопрочный** серый, зеленовато-серый, темно-серый, тонкозернистый, сильнотрещиноватый и очень сильнотрещиноватый, с маломощными углистыми прослойками, трещины ориентированы хаотично и под углами 0...15, 40...55 и 80...85° к оси керна. Грунт вскрыт локально по площади с глубины 2,2...34,0 м, вскрытой мощностью 0,5...12,6 м.

#### Инженерно-геологическое районирование площадки по несущей способности грунтов

Исследование проведено осенью 2018 г. в отделе геологии ТПУ и включало анализ информации, полученной из фондов изыскательской компании, установление принципов и методики районирования. В основу районирования были положены следующие факторы: геоморфологические условия; геологическое строение (литологический состав и несущая способность грунта, первого под почвенно-растительным слоем, его мощность); гидрогеологические и мерзлотные условия; наличие геологических процессов и явлений. Все информационные слои о природной среде обрабатывались с помощью геоинформационной системы (ГИС), а затем объединялись для получения единой инженерно-геологической карты в AutoCAD.

По пригодности участков к строительному освоению были выделены три категории районов с благоприятными, приемлемыми и неблагоприятными условиями (рис. 3, табл. 3). Выделенные районы отличаются геоморфологическими условиями, литологическим составом пород и соответствующей составу несущей способностью. Грунты площадки находятся повсеместно в мерзлом состоянии, поэтому этот фактор не использовался при выделении районов. Однако следует учесть, что в процессе строительства и эксплуатации промплощадки при оттаивании мерзлых грунтов могут происходить неравномерные осадки грунта из-за неравномерного оттаивания, а также из-за различной льдистости грунта, что потребует проведение мероприятий по уменьшению этих осадков.

**Категория** по условиям строительства характеризуется как благоприятная. К данной категории относятся участки, сложенные ИГЭ № 7, 8, 12, 13, имеющие высокую несущую способность.

Таблица 3. Экспликация к карте районирования

Table 3. Legend to the zoning map

Категория района по условиям строительства Category of district under the terms of the construction	Обозначение Marking	Геоморфологические условия Geomorphological conditions	Номер 1-го от поверхности ИГЭ Number of the 1 <sup>st</sup> soil unit	Несущая способность, МПа Bearing capacity, MPa	Геологические процессы Geological processes
I – благоприятные favourable		Плоские водоразделы, пологие склоны lat watersheds, gentle slopes	7, 8, 12, 13	0,3–0,6	Слабая заболоченность, редко морозное выпучивание крупнообломочного материала, линейная эрозия Weak bogginess, rare frosty buckling of coarse-grained material, linear erosion
II – приемлемые acceptable		Склоны средней крутизны (7–15°) Average slopes	4, 5, 6, 9, 10	0,2–0,3	Морозное выпучивание крупнообломочного материала Frosty buckling of coarse-grained material
III – неблагоприятные unfavourable		Долины средних и малых рек. Крутые склоны (>15°) Valleys of medium and small rivers. Steep slopes	1, 2, 3, 4	0,1–0,2	Морозное выпучивание крупнообломочного материала, заболоченность долин Frosty buckling of coarse-grained material, swampy valleys

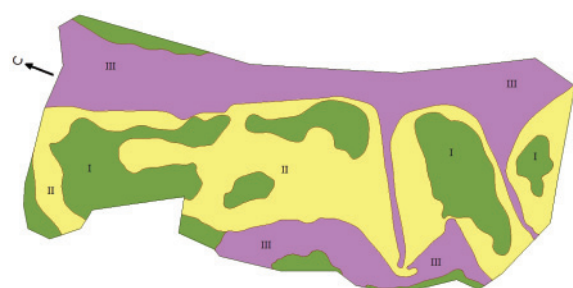


Рис. 3. Карта инженерно-геологического районирования площадки по несущей способности (Масштаб 1:5000)

Fig. 3. Map of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils (at scale 1:5000)

II категория с приемлемыми условиями для строительства. Эта категория занимает значительное пространство в пределах площади. Участки этой категории сложены ИГЭ № 4, 5, 6, 9, 10 со средней несущей способностью. Эксплуатация таких участков требует специальных инженерных мер защиты.

III категория с неблагоприятными условиями для строительства – это долины средних и малых рек, часто заболоченные или крутые склоны (с уклонами более 15°). С поверхности залегают ИГЭ № 1, 2, 3, 4 с невысокой несущей способностью. Использование таких участков возможно только после проведения мероприятий инженерной мелиорации.

### Выводы

Приведена инженерно-геологическая оценка территории промплощадки для установления ее

пригодности к застройке. Для этого рассмотрены основные природные компоненты: литология; топография; сейсмостектоника; геотехника; гидрология, гидрогеология и вечная мерзлота. В целом инженерно-геологические условия площадки являются достаточно сложными в связи с высокой сейсмической активностью района, наличием многолетней мерзлоты и таких геологических процессов, как поверхностное заболачивание площадки, морозное выпучивание каменного материала на склонах водоразделов, морозное пучение несвязных грунтов в зимний период и присутствие в разрезе сильно трещиноватых углей, алевролитов и песчаников «рухляков».

Все информационные слои о природной среде обрабатывались, затем объединялись для получения единой инженерно-геологической карты. На разработанной карте инженерно-геологического районирования выделены три категории районов с благоприятными, приемлемыми и неблагоприятными условиями для строительства, по геоморфологическим условиям, литологическому составу пород и их несущей способности. Дана характеристика выделенных категорий районов. Районирование территории по этим признакам может служить основой для принятия обоснованных решений при проектировании инженерных сооружений, базой для организации мониторинга, экспертизы.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасиadi Э.И., Абатuroва И.В., Тарасевич А.В. Опыт инженерно-геологического районирования территории строительства Воронцовского ГОКа с целью рационального использования и охраны геологической среды // Известия Уральского государственного горного университета. – 2001. – Т. 13. – С. 241–246.
- The influence of components of engineering-geological conditions on mineral mining in permafrost zone / I.V. Abaturova, L.A. Stro-

- rozhenko, I.G. Petrova, I.A. Koroleva // Gornyi Zhurnal. – 2015. – V. 9. – P. 22–27.
- Грязнов О.Н. Инженерно-геологические условия Урала: науч. моногр. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного горного университета, 2017. – 240 с.
- Ольховатенко В.Е. и др. Инженерная геология угольных месторождений Сибири и Дальнего Востока. Закономерности формирования инженерно-геологических условий угольных месторождений // под общ. ред. д.г.-м.н., проф. В.Е. Ольхова-

- тенко. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1992. – Т. 1. – 288 с.
5. Ольховатенко В.Е. и др. Инженерная геология угольных месторождений Сибири и Дальнего Востока. Инженерно-геологическая типизация угольных месторождений и оценка устойчивости бортов карьеров // под общ. ред. д.г.-м.н., проф. В.Е. Ольховатенко. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1992. – Т. 2. – 258 с.
  6. Нифантов Ф.П., Пуляев В.Н. Вопросы методики инженерно-геологических исследований буроугольных исследований Сибири на стадии предварительной разведки // Инженерно-геологические условия строительства крупных карьеров в Сибири. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1973. – 260 с.
  7. Ольховатенко В.Е., Трофимова Г.И. Инженерно-геологические условия разработки открытым способом угольных месторождений Ерунаковского района Кузбасса и оценка состояния окружающей среды. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2011. – 204 с.
  8. Щербак Г.Г. Закономерности формирования инженерно-геологических условий угольных месторождений Восточной Сибири и их влияние на устойчивость бортов карьеров: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 55 с.
  9. Ganova S.D. Geoeological aspects of creation and functioning of natural and technical systems in the conditions of the cryolithozone of Western Siberia // Proceedings of Higher Schools. Geology and exploration. – 2017. – № 5. – P. 58–64.
  10. Influence of coal mining on groundwater resources and countermeasures in Shanbei energy and chemical base / M.S. Zhang, Y. Dong, R.J. Du, X.F. Gu // Earth Science Frontiers. – 2010. – V. 17 (6). – P. 235–246.
  11. Effects of coal mining on shallow water resources in semiarid regions: a case study in the Shennan mining area, Shaanxi, China / W. Qiao, W.P. Li, T. Li, J.Y. Chang, Q. Wang // Mine Water Environment. – 2017. – V. 36 (1). – P. 104–113.
  12. Wang K., Lin Z.B., Zhang R.D. Impact of phosphate mining and separation of mined materials on the hydrology and water environment of the Huangbai River basin, China // Sci. Total Environment. – 2016. – V. 543. – P. 347–356.
  13. Research and development of the mine geological environment evaluation system / W.W. Jia, G.D. Bao, X.W. Wu, S.W. Jiang, C. Zhai // Advanced Materials Research. – 2011. – V. 270. – P. 1354–1359.
  14. Variations in the building site categories in the underground mining region of Doubrava (Czech Republic) for land use planning / M. Marschalko, I. Yilmaz, M. Bednárík, K. Kubečka // Engineering Geology. – 2011. – V. 122. – P. 169–178.
  15. Ullah K.M., Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: Case study Dhaka city // Transactions in GIS. – 2016. – V. 20 (1). – P. 20–37.
  16. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas», (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // Geosciences. – 2013. – V. 1. – P. 46–62.
  17. Гриб Н.Н., Кузнецов П.Ю. Прогнозирование физико-механических свойств углевмещающих пород на основе данных геофизических исследований скважин и математического аппарата Марковской нелинейной статистики // Уголь. – 2018. – № 1. – С. 68–73.
  18. Скоморошко Ю.Н. Оценка устойчивости горных пород в бортах карьеров по результатам геофизических исследований скважин (на примере Эльгинского месторождения): дис. ... канд. техн. наук. – Нерюнгри, 2001. – 181 с.
  19. Хоютанов Е.А. Обоснование резервов совершенствования процессов управления зольностью угля при разработке сложноструктурных месторождений (на примере Эльгинского месторождения): дис. ... канд. техн. наук. – Якутск, 2016. – 155 с.
  20. Бердюгин В.А. Условия отработки «Эльгинского» месторождения каменных углей и планируемые комплексы оборудования для его разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдел. выпуск. – 2009. – № 10. – С. 373–379.
  21. Николаева Н.А., Пинигин Д.Д. Оценка факторов техногенного воздействия на природную среду Эльгинского угольного комплекса // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. URL: [www.science-education.ru/119-14545](http://www.science-education.ru/119-14545) (дата обращения: 05.11.2018).
  22. Трофимов В.Т., Красилов Н.С. Инженерно-геологические карты. – М.: КДУ, Добросвет, 2018. – 383 с.
  23. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 59–68.
  24. Strokova L.A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 24. – 6 p.
  25. Strokova L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – 6 p.
  26. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33. – 6 p.
  27. Cheskidov V.V., Manevich A.I. Engineering and geological support for slope stability monitoring as a part of transport infrastructure construction projects // Mining science and technology. – 2016. – № 1. – С. 50–57.
  28. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-52 – Томмот. Объяснительная записка / А.В. Радьков, А.В. Молчанов, А.В. Терехов, Е.В. Беленко и др. – СПб.: Картографическая фабрика Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), 2016. – 276 с.
  29. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте: «Проект вскрытия участка первоочередной отработки Эльгинского месторождения в пределах Северо-западного участка» / А.В. Осьмушкин, Н.В. Осьмушкина и др. – Нерюнгри: Нерюнгростройизыскания, 2009. – 164 с.
  30. Отчет о производстве инженерно-геологических изысканий на объекте: «Эльгинский горно-обогатительный комплекс. I очередь строительства» на стадии проектная документация / А.В. Осьмушкин, Н.В. Осьмушкина и др. – Нерюнгри: Нерюнгростройизыскания, 2010. – 1314 с.

Поступила 10.12.2018 г.

#### Информация об авторах

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

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

**Осьмушкина Н.В.**, генеральный директор ООО «Нерюнгростройизыскания».

**Осьмушкин А.В.**, главный инженер ООО «Нерюнгростройизыскания».



UDC 624.131

## EXPERIENCE OF ENGINEERING-GEOLOGICAL ZONING ON BEARING CAPACITY OF SOILS OF THE INDUSTRIAL SITE OF ELGA COAL-PREPARATION PLANT IN YAKUTIA

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

Sofia A. Dmitrieva<sup>1</sup>,  
dmitrieva\_sa93@mail.ru

Natalia V. Osmushkina<sup>2</sup>,  
yjtisiz@nery.sakha.ru

Andrey V. Osmushkin<sup>2</sup>,  
yjtisiz@nery.sakha.ru

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

<sup>2</sup> Neryungriyostroyizyskaniya,  
1, YakutTisiz street, Neryungri, 678960, Russia.

The study is relevant due to the rapid growth of mining exploration and production activities in the permafrost regions of Russia over the last forty years. This paper presents the characteristics of the soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in the Republic of Sakha (Yakutia) on the bearing capacity. An engineering-geological evaluation is necessary to prepare decision making on land planning and land use of the area as well as to carry out the required industrial and infrastructure development with slight impact on breakable environment, which will be accompanied by reducing hazards and damage to constructions with consequent savings to people and property. This study aims to describe the engineering-geological and hydrogeological conditions, exogenous geological processes that may be relevant to establish suitability for development.

**Object** of the research is the geological environment. The authors have considered the main natural components, which influence land use planning and development, such as lithology; topography; seismotectonic; geotechnic; hydrology-hydrogeology and permafrost.

**Methods.** This study includes a brief review of relevant literature, and a summary of information obtained from geological survey company files. All information layers about the natural environment were manipulated and combined to produce uniform engineering geological map.

**Results.** We produced a suitability map of the study area that shows three different zones such as favourable, acceptable and unfavourable conditions for building construction.

### Key words:

Coal-preparation plant, open-pit mining, soil, coal, geological process, physical and mechanical properties, bearing capacity, zoning.

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

### REFERENCES

1. Afanasiadi E.I., Abaturova I.V., Tarasevich A.V. Opyt inzhenerno-geologicheskogo rayonirovaniya territorii stroitelstva Vorontsovskogo GOKa s tselyu ratsionalnogo ispolzovaniya i okhrany geologicheskoy sredy [Experience of engineering-geological zoning of the territory of construction of Vorontsov GOK for rational use of the geological environment protection]. *News of the Ural state mining University*, 2001, vol. 13, pp. 241–246.
2. Abaturova I.V., Storozhenko I.A., Korolyova I.G. Influence of the components of engineering-geological conditions on the extraction of minerals in the permafrost zone. *Mining journal*, 2015, vol. 9, pp. 22–27.
3. Gryaznov O.N. *Inzhenerno-geologicheskie usloviya Urala* [Engineering-geological conditions of the Urals: scientific monograph]. Ekaterinburg, Ural state mining university, 2017. 240 p.
4. Olkhovatenko V.E. *Inzhenernaya geologiya ugolnykh mestorozhdeniy Sibiri i Dalnego Vostoka. Zakonomernosti formirovaniya inzhenerno-geologicheskikh usloviy ugolnykh mestorozhdeniy* [Engineering Geology of coal deposits of Siberia and the Far East. Regularities of formation of engineering-geological conditions of coal fields]. Tomsk, Tomsk State University Publ. house, 1992. Vol. 1, 288 p.
5. Olkhovatenko V.E. *Inzhenernaya geologiya ugolnykh mestorozhdeniy Sibiri i Dalnego Vostoka. Inzhenerno-geologicheskaya tipizatsiya ugolnykh mestorozhdeniy i otsenka ustoychivosti bortov karerov* [Engineering Geology of coal deposits of Siberia and the Far East. Engineering-geological typification of coal deposits and evaluation of stability of pit walls]. Tomsk, Tomsk State University Publ. house, 1992. Vol. 2, 258 p.
6. Nifantov F.P., Pulyaev V.N. Voprosy metodiki inzhenerno-geologicheskikh issledovaniy burougolnykh issledovaniy Sibiri na stadii predvaritelnoy razvedki [Issues of methodology of engineering-geological investigations of the lignite research of Siberia at the stage of preliminary investigation]. *Inzhenerno-geologicheskie usloviya stroitelstva krupnykh karerov v Sibiri* [Engineering-geological conditions for the construction of large open pit mines in Siberia]. Tomsk, Tomsk State University Publ. house, 1973. 260 p.
7. Olkhovatenko V.E., Trofimova G.I. *Inzhenerno-geologicheskie usloviya razraboki otkrytym sposobom ugolnykh mestorozhdeniy Erunakovskogo rayona Kuzbassa i otsenka sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Engineering-geological conditions of development of the open method of coal deposits Erunakovsky area of Kuzbas and assessment of the environment]. Tomsk, Tomsk State University Publ. house, 1992. 260 p.



- sity of Architecture and Building Publ. house, 2011. 204 p.
8. Shherbak G.G. *Zakonomernosti formirovaniya inzhenerno-geologicheskikh usloviy ugolnykh mestorozhdeniy Vostochnoy Sibiri i ikh vliyaniye na ustoychivost bortov karerov*. Avtoreferat Dokt. nauk [Regularities of formation of engineering-geological conditions of coal deposits in Eastern Siberia and their impact on the stability of the sides of the quarries. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2003. 55 p.
9. Ganova S.D. Geoeological aspects of creation and functioning of natural and technical systems in the conditions of the cryolithozone of Western Siberia. *Proc. of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2017, no. 5, pp. 58–64.
10. Zhang M.S., Dong Y., Du R.J., Gu X.F. Influence of coal mining on groundwater resources and countermeasures in Shanbei energy and chemical base. *Earth Science Frontiers*, 2010, vol. 17 (6), pp. 235–246.
11. Qiao W., Li W.P., Li T., Chang J.Y., Wang Q. Effects of coal mining on shallow water resources in semiarid regions: a case study in the Shennan mining area, Shaanxi, China. *Mine Water Environment*, 2017, vol. 36 (1), pp. 104–113.
12. Wang K., Lin Z.B., Zhang R.D. Impact of phosphate mining and separation of mined materials on the hydrology and water environment of the Huangbai River basin, China. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 543, pp. 347–356.
13. Jia W.W., Bao G.D., Wu X.W., Jiang S.W., Zhai C. Research and development of the mine geological environment evaluation system. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 270, pp. 1354–1359.
14. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárík M., Kubečka K. Variations in the building site categories in the underground mining region of Doubrava (Czech Republic) for land use planning. *Engineering Geology*, 2011, vol. 122, pp. 169–178.
15. Ullah K.M., Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: Case study Dhaka city. *Transactions in GIS*, 2016, vol. 20 (1), pp. 20–37.
16. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas», (Central Spanish System, Salamanca, Spain). *Geosciences*, 2013, vol. 1, pp. 46–62.
17. Grib N.N., Kuznetsov P.Yu. Prediction of physical and mechanical properties of coal-bearing rocks on the basis of well logging data and mathematical apparatus of Markov nonlinear statistics. *Ugol (Russian Coal Journal)*, 2018, no. 1, pp. 68–73.
18. Skomoroshko Yu.N. *Otsenka ustoychivosti gornyykh porod v bortakh karerov po rezul'tatam geofizicheskikh issledovaniy skvazhin (na primere Elginskogo mestorozhdeniya)*. Dis. Kand. nauk [Evaluation of rock stability in the sides of the quarries on the basis of geophysical studies of wells (on the example of Elgin field). Cand. Diss.]. Neryungri, 2001. 181 p.
19. Khoyutanov E.A. *Obosnovanie rezervov sovershenstvovaniya protsessov upravleniya zolnostyu uglia pri razrabotke slozhno-strukturnykh mestorozhdeniy (na primere Elginskogo mestorozhdeniya)*. Dis. Kand. nauk [Substantiation of reserves of improving the management of coal ash in development of complex fields (on the example of Elga Deposit)]. Cand. Diss.]. Yakutsk, 2016. 155 p.
20. Berdyugin V.A. Conditions of mining of the Elginsky coal deposit and planned complexes of equipment for its development. *Mining information Bulletin*, 2009, vol. 10, pp. 373–379.
21. Nikolaeva N.A., Pinigin D.D. Assessment of factors of technogenic impact on the natural environment of the Elginsky coal complex. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 5; Available at: [www.science-education.ru/119-14545](http://www.science-education.ru/119-14545) (accessed: 05 November 2018).
22. Trofimov V.T., Krasilova N.S. *Inzhenerno-geologicheskie karty [Engineering-geological maps]*. Moscow, KDU, Dobrosvet Publ., 2018. 383 p.
23. Stroková L.A., Ermolaeva A.V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 59–68. In Rus.
24. Stroková L.A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, 012030, 6 p.
25. Stroková L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 012051, 6 p.
26. Purgina D.V., Stroková L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 01246, 6 p.
27. Cheskidov V.V., Manevich A.I. Engineering and geological support for slope stability monitoring as a part of transport infrastructure construction projects. *Mining science and technology*, 2016, no. 1, pp. 50–57.
28. Radkov A.V., Molchanov A.V., Terekhov A.V., Belenko E.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (trete pokolenie). Seriya Aldano-Zabaykalskaya. List O-52 – Tommot*. [The state geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Aldano-Zabaykalskaya. Sheet O-52-Tommot. Explanatory note]. St-Petersburg, Map factory VSEGEI, 2016. 276 p.
29. Osmushkin A.V., Osmushkina N.V. *Otchet ob inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh na obekte: «Proekt vskrytiya uchastka pervoocherednoy otrabotki Elginskogo mestorozhdeniya v predelakh Severo-zapadnogo uchastka»* [Report on engineering-geological surveys at the facility: «The project of opening the site of priority mining Elga field within the North-Western area»]. Neryungri, 2009. 164 p.
30. Osmushkin A.V., Osmushkina N.V. *Otchet ob inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh na obekte «Elginsky gorno-obogatitelny kompleks. I cohred stroitelstva» na stadia proektnaya dokumentatsiya* [Report on production of engineering-geological surveys at the facility: «Elga mining and processing complex. I<sup>st</sup> stage of construction». The stage of Project Documentation]. Neryungri, 2010. 1314 p.

Received: 10 December 2018.

#### Information about the authors

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

**Sofia A. Dmitrieva**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Natalia V. Osmushkina**, general director, Neryungristroyizyskaniya.

**Andrey V. Osmushkin**, chief engineer, Neryungristroyizyskaniya.

УДК 556.5.072

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ УРОВНЯХ ВОДЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ЗАДАЧ ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ, А ТАКЖЕ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ВБЛИЗИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Романовский Роман Владимирович,  
keny146@gmail.com

ОАО «Кузбассгипрошахт»,  
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Н. Островского, 34.

**Актуальность** моделирования зон максимального разлива рек (зон затопления) при проведении инженерных изысканий для проектирования и строительства объектов хозяйственной деятельности, разработки проектов рекультивации нарушенных земель в зонах непосредственного влияния водных объектов связана с тем, что в современных условиях, при постоянно растущих требованиях к безопасности и бесперебойности работы проектируемых сооружений, существующие методики оценки опасности затопления не всегда дают удовлетворительный результат, чтобы в полной мере оценить наличие или отсутствие риска для проектируемого сооружения.

**Цель работы:** анализ отечественного и зарубежного опыта моделирования зон затопления при максимальных уровнях воды рек для практического решения задач инженерного проектирования, оценка достоинств и недостатков основных подходов в практике изысканий, демонстрация возможностей одного из способов моделирования при решении конкретной инженерной задачи.

**Методы.** При подготовке исходных данных для создания цифровой модели рельефа применялся метод анализа пространственных данных при помощи геоинформационных систем, для расчета максимальной зоны затопления – метод численного моделирования зоны затопления р. Иня и расположенной по левому берегу отработанной карьерной выемки в рамках производства работ по подготовке проекта рекультивации нарушенных земель. Численное моделирование выполнялось при помощи моделирующей системы HEC-RAS версии 5.0.5.

**Результаты.** Произведен обзор существующей мировой и отечественной практики численного моделирования зон затопления рек при решении задач в области инженерного проектирования, приведена собственная модель расчетной зоны затопления на примере участка рекультивации «Моховское поле», показан пример оценки влияния на рекультивируемый объект при реализации наиболее негативного сценария (вероятное затопление карьерной выемки в период прохождения максимального расхода воды 1 % обеспеченности), описаны достоинства и недостатки применения разных подходов на практике.

### Ключевые слова:

Геоинформационные системы, численное моделирование зон затопления рек, 2D моделирование, цифровая модель рельефа, данные дистанционного зондирования земли, моделирующие системы, HEC-RAS.

### Введение

На сегодняшний день математическое моделирование является одной из самых нетривиальных и не установившихся отраслей в гидрологии, в том числе и инженерной. По своей сути моделирование – это способ изучения реально существующих в природе явлений и процессов, имеющих отношение к определенному кругу проблем или задач, а модель – это, в некотором роде, отражение реальности, упрощенное представление о реальном природном процессе, определенным образом организованное и структурированное знание [1].

Однако следует сразу оговориться, что несмотря на то, что практически для любой модели можно подобрать величины параметров, удовлетворяющих решению, в большинстве случаев эти параметры не будут универсальными и не смогут быть прямо экстраполированы на модель при изменении ситуации. В результате различного рода ошибок и погрешностей в измеренных или рассчитанных и принятых для модели данных, а также невозможности в полной мере описать всю сложность и многофакторность природы как некий конечный, строго детерминированный набор пространственно-временных параметров, ни одна модель не может быть рассмотрена как истинное представление природы [2].

Развитие научно-технического прогресса в области проектирования и строительства с каждым годом выводит данную отрасль на более высокий, невиданный доселе технический уровень, заставляя использовать все передовые достижения науки, техники и инженерии.

Одним из важнейших этапов при проектировании является выполнение различного рода инженерных изысканий, которые согласно действующему законодательству являются обязательной частью градостроительной деятельности [3].

Инженерные изыскания в общем случае проводятся с целью получения необходимых и достаточных материалов для принятия обоснованных проектных решений. Таким образом, результаты, полученные в рамках инженерных изысканий, являются фундаментом, на котором будут основаны все последующие проектные решения, места размещения площадок строительства, выбор типа и материала конструкций. Точность и качество определения различных расчетных характеристик при этом будет существенно влиять на сроки безаварийной эксплуатации зданий и сооружений, на экономику и, в конечном итоге, на жизнь людей.

Настоящей статьей рассмотрена такая отрасль инженерных изысканий, как инженерно-гидроме-

теоретические изыскания, одной из основных задач которых, в частности, является задача определения размера расчетной зоны затопления при максимальных уровнях воды заданной вероятности превышения.

Данная задача может быть решена различными способами, как установленными и официально рекомендуемыми действующей нормативной документацией [4], так и методами численного моделирования гидравлики открытых потоков с использованием различного рода моделирующих систем.

Дан краткий обзор практики компьютерного моделирования зон затопления в России и за рубежом, рассмотрена такая моделирующая система, как HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) [5, 6], на примере функционала которой автором дано краткое описание процесса моделирования расчетной зоны затопления на участке рекультивации «Моховское поле» на предпроектной стадии изысканий, описан отечественный и зарубежный инженерный опыт в данной сфере, а также проведено сравнение основных типов подходов с выявлением их положительных и отрицательных сторон.

#### Обзор отечественной и зарубежной практики моделирования расчетных зон затопления

В настоящее время в области инженерной гидрологии как в России, так и за рубежом становятся все более популярными различные системы для моделирования гидравлики открытых потоков (рек, ру-

чьев, каналов и т. д.). При анализе последних статей и исследований в данной области автором было отмечено, что в целом можно выделить два основных принципиальных подхода к решению проблемы моделирования зон затопления: 1) ГИС-ориентированный, или геометрический, подход, отраженный в работах, когда форма кривой свободной поверхности находится путем присвоения заранее рассчитанной отметки уреза для каждого отдельного створа, а затем производится дальнейшая пространственная интерполяция этих отметок выше или ниже по течению с учетом уклона водной поверхности, и 2) собственно гидравлический подход, когда искомые очертания зоны затопления определяются путем решения одно- и двумерных уравнений движения жидкости, нахождения формы кривой свободной поверхности численными методами и наложения полученных отметок на имеющуюся цифровую модель рельефа (ЦМР).

*Геометрический подход.* Примеры так называемого ГИС-ориентированного или геометрического подхода нашли свое отражение в статьях [7–11]. Подробно хочется отметить работу [7], где применен классический геометрический подход к решению задачи определения границ расчетной зоны затопления на примере р. Белой средствами программного комплекса ArcGIS путем построения набора плоскостей, которые в некотором приближении описывают поверхность зеркала воды, и нахождения пересечений данных плоскостей с поверхностью ЦМР (рис. 1).

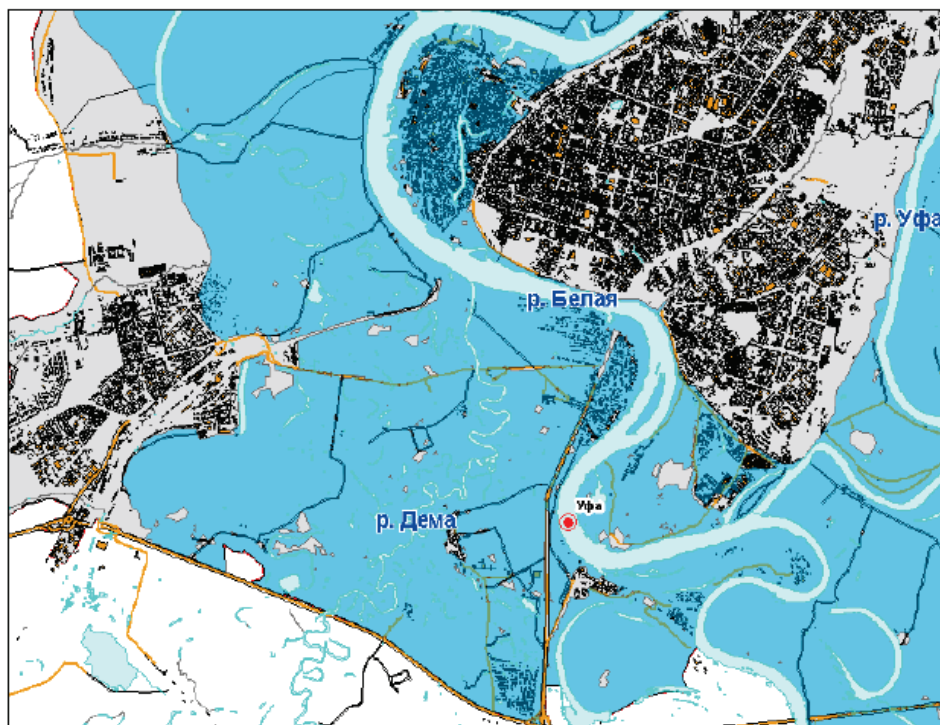


Рис. 1. Пример полученной в работе [7] зоны затопления

Fig. 1. Example of the flood zone obtained in [7]



Демонстрация полученных результатов осуществляется при этом средствами 3D визуализации, встроеными в пакет ArcGIS. В работе [8] аналогичным образом, но при помощи системы «Панорама ГИС» на основе топографической съемки создавалась цифровая модель рельефа, в которой на основании постоянного уклона водной поверхности, полученного путем ее нивелировки создавались, и заранее вычисленных расчетных уровней воды создавалась модель зоны затопления в виде наклонной плоскости.

Несколько другой подход к решению проблемы нахождения границ расчетной зоны затопления в рамках геометрического метода удалось реализовать в работе [11], где авторы используют следующий алгоритм. Во-первых, получают ЦМР с использованием SRTM матрицы [12], уточненной результатами единичных промеров по руслу и пойме (так как SRTM-матрица не содержит отметок в самом русле), а также данными с лоцманских карт. Во-вторых, русло реки по всей рассматриваемой длине разбивается поперечными сечениями через определенный интервал, по каждому из таких сечений заранее получена отметка расчетного уровня воды, уровни воды между сечениями передаются по уклону водной поверхности. Далее из полученных абсолютных отметок расчетного уровня воды в пределах каждого участка вычитаются отметки дна русла и поймы, в результате чего получаются пространственно распределенные данные о глубинах воды в предполагаемой зоне затопления, а по нулевым значениям этих глубин проводится результирующий контур границы зоны затопления. Техническая реализация данной методики осуществлялась авторами при помощи САПР AutoCAD Civil 3D, системы баз данных MS Access и различных ГИС пакетов. Оценка валидности методики проводилась путем сравнения полученных расчетных зон затопления с реально наблюдаемыми на космических снимках. Результаты такого сравнения показали достаточно высокую достоверность получаемых границ расчетных зон затопления.

*Гидравлический подход* нашел свое применение в работах [13–18]. Так, например, в работе [13] было произведено моделирование зоны затопления р. Киндерка – левый приток р. Казанка (г. Казань) на участке длиной около 440 км, находящемся в 8,3 км от устья, с целью оценки опасности затопления и определения безопасных для жилой застройки мест. Моделирующей системой при этом был выбран программный комплекс HEC-RAS (River analysis system) версии 5.0.3, позволяющий решать задачу гидравлического моделирования кривой свободной поверхности и зоны затопления для установившегося и неустановившегося режима движения воды путем решения одномерных или двумерных уравнений движения жидкости (1D и 2D моделирование), либо их комбинации, в зависимости от задачи. При этом граничные условия могут задаваться совершенно различными спосо-

бами, что очень расширяет возможности применения подобных комплексов. В работе [13] задача определения расчетной зоны затопления осуществлялась путем 1D моделирования при установившемся движении воды, а в качестве граничных условий задавались расчетные расходы воды различных вероятностей превышения, для каждой из которых численными методами были получены искомые границы зон затопления. В результате авторами были выделены опасные для застройки, с точки зрения затопления, зоны.

Среди работ иностранных авторов в настоящее время имеет высокую популярность тематика моделирования зон затопления на урбанизированных территориях, как, например, в работе [14], в которой объектом исследования являлась река Lee River в районе Cork City (Ireland). В данном случае характерно, что городская территория располагается в 5 км от устья реки Lee River, которая впадает в Атлантический океан, соответственно, при расчете зоны затопления необходимо учитывать приливы. Таким образом, затопление поймы в пределах города происходит с двух направлений – путем прихода паводочной волны непосредственно по реке и путем прихода приливных и штормовых волн со стороны Атлантики. В период штормов количество жидких атмосферных осадков резко увеличивается и пиковый расход воды возрастает с 40 до 500 м<sup>3</sup>/с, а приливные и ветровые волны, достигающие до города, имеют высоту до 0,5 м. Этот комплексный процесс нередко вызывает достаточно сильные наводнения со значительным финансовым ущербом. В статье также показано, что решение данной задачи будет эффективным только при использовании 2D модели, которая реализует численное решение двумерной системы уравнений Навье–Стокса и наиболее адекватно описывает характер движения жидкости при выходе воды на пойму с учетом действия приливных и штормовых волн. Технически решение данной задачи производилось в программном комплексе собственной разработки авторов статьи [14] MSN\_Flood (Multi-scale nesting), который позволяет при работе с пространственными данными внедрять детали высокого разрешения в более общую пространственную модель, что по мнению авторов является наиболее эффективным решением для моделирования наводнений на урбанизированных территориях, с точки зрения требований к компьютерным мощностям.

Основным выводом исследования постулируется, что рассмотренный подход наглядно показывает то, как численные модели помогают лучше понять динамику распространения наводнения, обладают большим потенциалом для пространственного и временного анализа наводнений, а также могут существенно облегчить работу при планировании противопаводковых мероприятий и ликвидации их последствий.

В работе китайских коллег [15] показано решение задачи гидравлического моделирования зоны



затопления при гипотетическом прорыве плотины водохранилища Qingshan Reservoir. Данной работой показано, что при моделировании затоплений, связанных с прорывом плотин и дамб, и движении большого потока воды вне русла рек (как это обычно бывает при подобных авариях) наиболее обоснованным, по мнению авторов работы, является применение 2D моделей, как наиболее адекватно описывающих процесс затопления при неустановившемся режиме движения жидкости, а также дающих возможность получить пространственное распределение глубин и скоростей потока.

В статье [16] показан пример совмещения моделирования стока и получения модели гидрографа и, собственно, гидравлического моделирования заданного участка реки в один комплекс. При этом гидравлическая модель была реализована в моделирующей системе HEC-RAS. С точки зрения разработки гидравлической модели, в данной работе была изучена работа так называемой саморегулирующейся дамбы (self-regulated flood dam, SRFD), которая призвана регулировать сток в период паводка, а излишки воды сбрасывать в автоматическом режиме в нижний бьеф, и ее влияние на паводковую ситуацию. Результатом данной работы является вывод о том, что разработка подобных комплексных стоково-гидравлических моделей является достаточно эффективным инструментом при решении задач по выбору места размещения различных защитных или выполняющих регулируемую функцию гидротехнических сооружений, а также для целей водно-ресурсного планирования.

В работе [17] довольно подробно освещена проблематика, теоретическая часть и методика моделирования зоны затопления реки Mamore river, протекающей на равнине Llanos de Moxos в Боливии. Гидравлическая модель реализована на базе моделирующей системы HEC-RAS, версии 5, а в качестве численной модели была принята 2D модель. Основной предпосылкой для выбора 2D модели в данной работе является обоснованный ссылками на соответствующие работы и исследования вывод о том, что данная модель более адекватно описывает процесс затопления при выходе воды на пойму. Также авторами отмечено, что достаточно серьезный потенциал имеют гибридные 1D-2D модели, описывающие как движение воды в русле, так и движение воды после ее выхода на пойму, причем для каждого из этих режимов используется свой метод расчета. Результатами данной работы был детально показан процесс затопления поймы, получены границы зоны затопления, временные и пространственные ее характеристики, выполнена оценка риска для близлежащих городов Тринидад и Сан-Хавьер, сделан акцент на высокой эффективности подобного подхода, а также на высоком потенциале моделирующей системы HEC-RAS, как наиболее доступной и при этом обладающей достаточно серьезным функционалом для решения подобных задач.

В контексте решения научных задач широко применяется практика использования продвинутых в функциональном отношении коммерческих моделирующих систем, таких как SMS (Surface-water modelling system). Исторически, на заре своего возникновения в 1980-х гг., комплекс SMS разрабатывался Корпусом военных инженеров армии США и состоял из большого числа модулей, необходимых для решения различного рода задач, связанных с гидравлическим моделированием рек, устьевых участков рек, моделированием волн и т. д., в том числе и модуля по моделированию речной гидравлики HEC-RAS. Впоследствии команда разработчиков SMS перешла в другую компанию, а системы SMS и HEC-RAS стали развиваться параллельно, постепенно теряя сходства и приобретая свои отличительные черты. На сегодняшний день система SMS довольно широко применяется для моделирования речной (морской) гидравлики при решении научных и практических задач, имея при этом свои очевидные достоинства и недостатки.

Так, в работе [18] путем численного моделирования изучалась схема течений, которая могла бы существовать при сбросе ледниково-подпрудного озера в Курайской котловине. Хотя основной линией данного исследования было изучение, на базе двумерной компьютерной модели, распределения течений, в качестве побочного результата была получена граница зоны затопления, вызванная гигантским водным потоком в результате опорожнения Чуйского и Курайского озер, имевшего место быть в рамках теории дилuviальных потоков. Цифровая модель рельефа в данной работе создавалась на базе SRTM матрицы, на основе современного рельефа местности. Полученные в рамках данного исследования результаты авторы характеризуют как предварительные, однако сопоставление этих результатов с ориентацией дюн на дне Курайской котловины, а также с результатами ранее проведенных палеогидрологических реконструкций показало хорошую их сходимость.

Для обоих подходов объединяющим фактором является то, что основой для качественного определения границ расчетной зоны затопления является качество исходной ЦМР. Нередко для решения задач определения границ расчетных зон затопления на достаточно протяженных участках рек используются данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), такие как SRTM, LIDAR, ASTER Global DEM и др. Матрицы высотных отметок, полученные из открытых источников, должны уточняться по данным локальных промеров, топографических съемок либо крупномасштабных карт в русловых и пойменных областях исследуемых водотоков.

В работе [19], в частности, описана методика улучшения высотной матрицы TanDEM-X при помощи SAR (Synthetic-aperture radar) технологии, которая позволяет получать данные о форме земной поверхности при помощи методов радиолокации.

В целом качество существующих на сегодняшний день цифровых моделей рельефа описано во многих статьях. Так, в статье [20] произведена оценка качества и сравнение таких глобальных ЦМР, как Aster GDEM и SRTM DEM, которая показала, что обе ЦМР имеют достаточно широкий разброс в точности данных в зависимости от степени пересеченности рельефа, наличия или отсутствия на конкретном участке древесной растительности и других факторов. В общем случае для обеих матриц пространственное разрешение колеблется от 25 до 30 м, а разрешение по высотным отметкам колеблется в среднем от 3 до 10 м.

Таким образом, при использовании любых глобальных ЦМР для моделирования расчетных зон затопления рек, в зависимости от целей и задач, русловые и пойменные участки рекомендуется уточнять дополнительными промерами и съемками. На практике, при решении изыскательских и инженерных задач, где требуется достаточно точная оценка угрозы затопления проектируемого объекта, рельеф дна и поймы должен быть обязательно уточнен путем русловой съемки и детальных топографических работ. Использование для подобных задач только лишь глобальных SRTM или Lidar матриц некорректно, так как погрешность определения уровня воды в таком случае может достигать трех и более метров, что является абсолютно неприемлемым. Для решения многих научных задач и некоторых практических, когда моделируется прохождение особенно больших расходов воды (например, при прорыве плотин водохранилищ), данная погрешность не будет иметь значения, так как качество отображения рельефа русла и поймы практически не будет влиять на отметки уровня воды при прохождении катастрофического расхода воды, а роль русла будет играть длина реки либо иные орографические элементы.

#### **Моделирование расчетной зоны затопления на примере участка рекультивации нарушенных земель в зоне непосредственного влияния р. Иня**

В настоящей статье приведен собственный пример моделирования расчетной зоны затопления р. Иня, выполненный автором в рамках гидрологического обеспечения работ по рекультивации нарушенных земель участка «Моховское поле» в Кемеровской области.

*Краткие сведения о районе работ.* Моховский угольный разрез был образован в 2009 г. путем слияния трех филиалов (разрезов) компании – Моховского, Сартакинского и Караканского. Моховское поле филиала расположено в юго-западной части Ленинск-Кузнецкого района в Ленинском и Салтымаковском геолого-промышленных районах Кузнецкого бассейна и находится в центральной части Егозово-Красноярского и Борисовского месторождений. Поле ликвидируемого участка № 8 (Южное замыкание Ленинской синклинали) располагается в юго-восточной части Ленинского геолого-экономического района Кузбасса. В непосред-

ственной близости от участка расположена железнодорожная станция «Мереть». Ближайшими населенными пунктами являются: г. Полысаево, п. Красногорский, п. ст. Мереть, п.г.т. Грамотейно. В 2 км восточнее участка проходит шоссейная дорога I категории, соединяющая города Ленинск-Кузнецкий и Белово. Участок № 8 приурочен к долине реки Иня. Наивысшая абсолютная отметка рельефа в настоящее время составляет 220,4 м БС, наиболее низкая 92,0 м БС (в карьерной выемке).

#### **Краткая математическая основа работы двумерной модели (2D) неустановившегося движения**

Модель строилась с использованием моделирующей системы HEC-RAS версии 5.0.5 по схеме 2D моделирования, подробная физико-математическая основа работы которой очень детально описана в руководствах к программе HEC-RAS и научных работах [21–26]. Выбор типа моделирующей системы производился автором по принципу соотношения функциональности и доступности программного обеспечения для широкого круга пользователей. Программное обеспечение HEC-RAS предоставляется на условии его свободного распространения, но в то же время данная моделирующая система является полнофункциональной и пригодной для решения практических и научных задач по моделированию речной гидравлики.

Поставленная задача решалась путем применения так называемой двумерной модели (2D модель), которая реализует в себе решение двумерного уравнения Сен-Венана (при опциональном учете турбулентного момента и силы Кориолиса) либо двумерного уравнения Диффузной Волны (Diffusion Wave equation). Уравнения «мелкой воды» в той форме, в которой они реализуются в рассматриваемой моделирующей системе HEC-RAS, состоят в общем случае из уравнения неразрывности и уравнений динамического равновесия, которые кратко затронем ниже.

Уравнение неразрывности в дифференциальной форме имеет вид (1):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $u$  и  $v$  – горизонтальные и вертикальные компоненты скорости;  $q$  – переменная, отражающая дополнительный приток/отток жидкости на моделируемом участке.

Уравнение (1), но в интегральной форме, применяется в контексте метода рельефной «суб-сетки» (sub-grid bathymetry approach), используемого в системе HEC-RAS [25]. Идея данного подхода представляет собой определенный компромисс, при котором вместо непосредственного использования в расчетах «тяжелых» данных о рельефе высокого разрешения используют облегченный набор пространственных данных (суб-сетка), но с предва- рительно вычисленной на основе данных высокого разрешения дополнительной атрибутивной информацией, такой как гидравлический радиус, объем

и смоченный периметр. Детали высокого разрешения при этом теряются, но в системе остается вся необходимая информация для того, чтобы численными методами найти решение задачи через уравнение неразрывности.

**Уравнения динамического равновесия.** Закон неразрывности в общем случае гласит, что если горизонтальные масштабы акватории много меньше вертикальных, то вертикальные составляющие скорости малы и ими можно пренебречь. Уравнение Навье–Стокса для вертикальной составляющей скорости может быть использовано, чтобы обосновать, что давление стремится к гидростатическому. В открытом речном потоке воздействие атмосферы в виде бароклинических градиентов давления (при переменной плотности среды) и силы касательного напряжения ветра являются несущественными и ими можно пренебречь. Вертикальная скорость и ее производные составляющие могут быть, таким образом, исключены из уравнений (в обоих случаях для уравнения неразрывности и динамического равновесия). Тогда уравнения «мелкой воды» принимают вид (2), (3):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \\ = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \\ = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $u$  и  $v$  – скорости в Декартовой системе координат;  $g$  – ускорение свободного падения;  $v_t$  – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости жидкости;  $c_f$  – коэффициент донного трения;  $R$  – гидравлический радиус;  $f$  – параметр силы Кориолиса.

Для того чтобы эффективно использовать численные методы решения, территория разбивается на множество не перекрывающих друг друга полигонов, образующих сетку. У алгоритма решения нет строгих внутренних ограничений в отношении количества сторон для полигональных ячеек сетки, однако разработчиками системы HEC-RAS для улучшения производительности и эффективного использования ресурсов памяти ЭВМ это количество намеренно было ограничено до восьми. В силу того, что в расчетах используется второй порядок производных, а также из-за дифференциальной природы взаимосвязей между переменными, дополнительно к регулярной сетке ячеек в системе используется дублирующая сетка, которая служит для того, чтобы численно решать дифференциальные уравнения. Дублирующая сетка также охва-

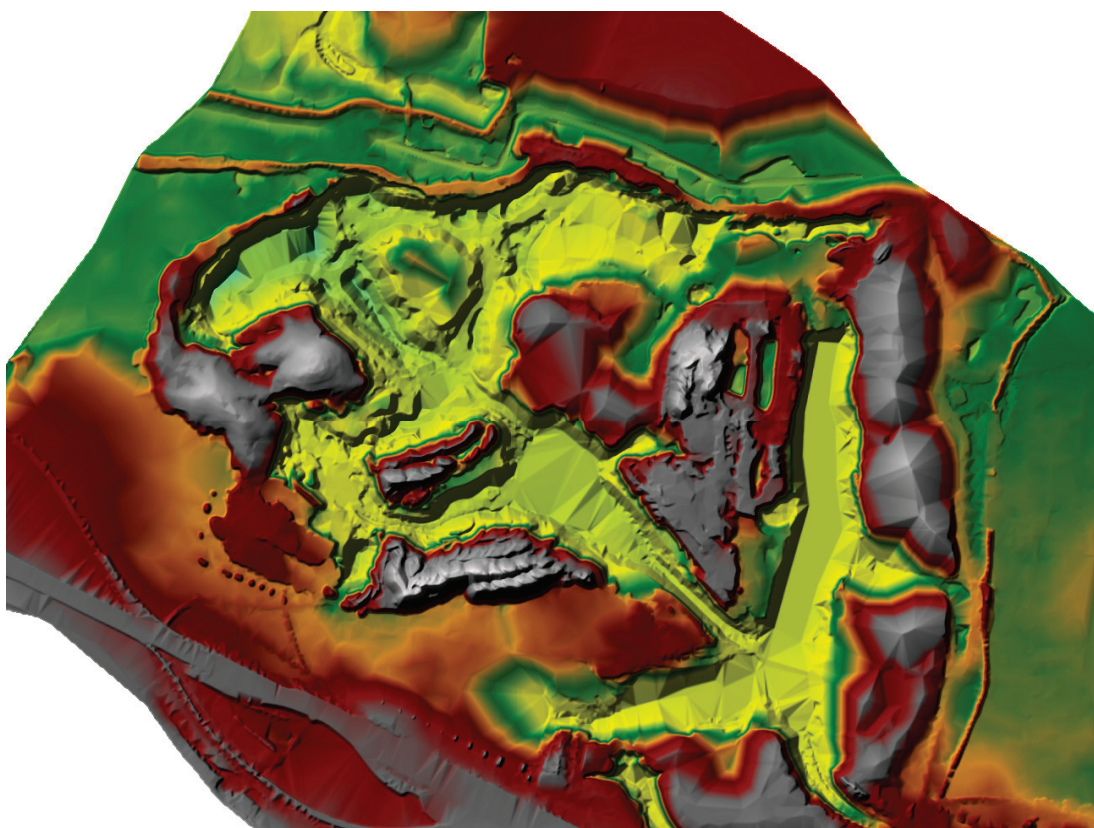


Рис. 2. Цифровая модель рельефа участка реки и прилегающей отработанной карьерной выемки участка № 8 «Моховского поля»

Fig. 2. Digital elevation model (DEM) of the simulated section of the river and adjacent abandoned quarry excavation of section No. 8 of «Mokhovskoe pole»



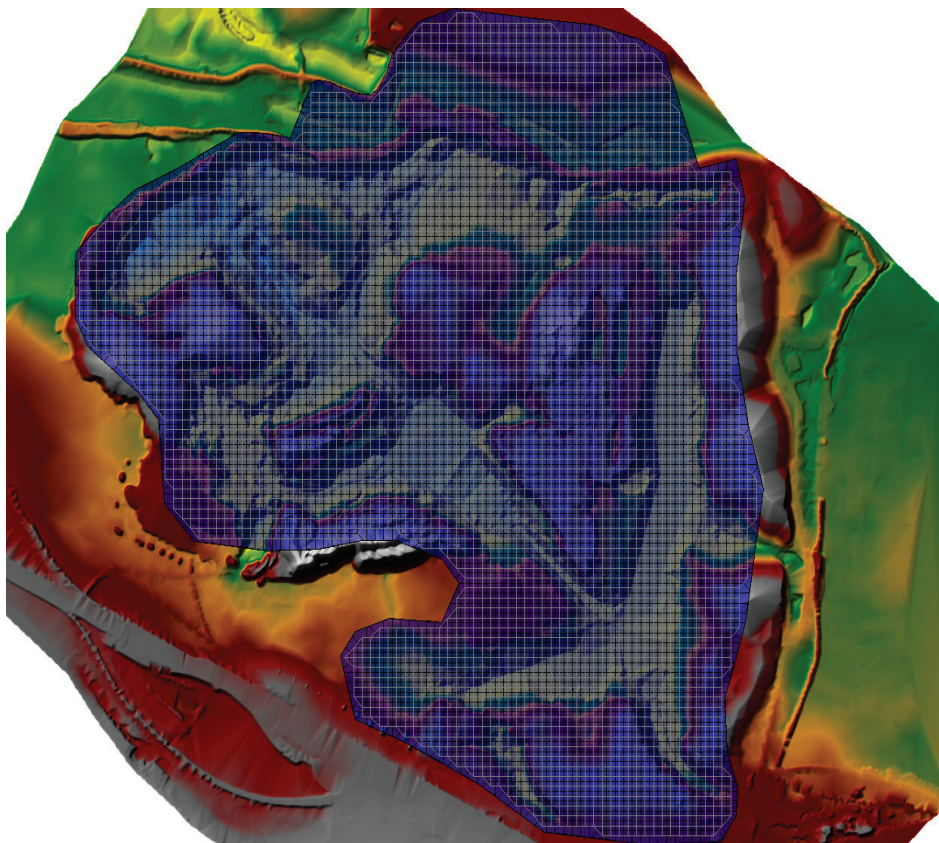


Рис. 3. Положение расчетной 2D сетки ячеек на рассматриваемой ЦМР (показана в виде закрашенной фиолетовым цветом области, разделенной на ячейки)

Fig. 3. Position of the calculated 2D grid of cells on the considered DEM (shown as a violet-colored area divided into cells)

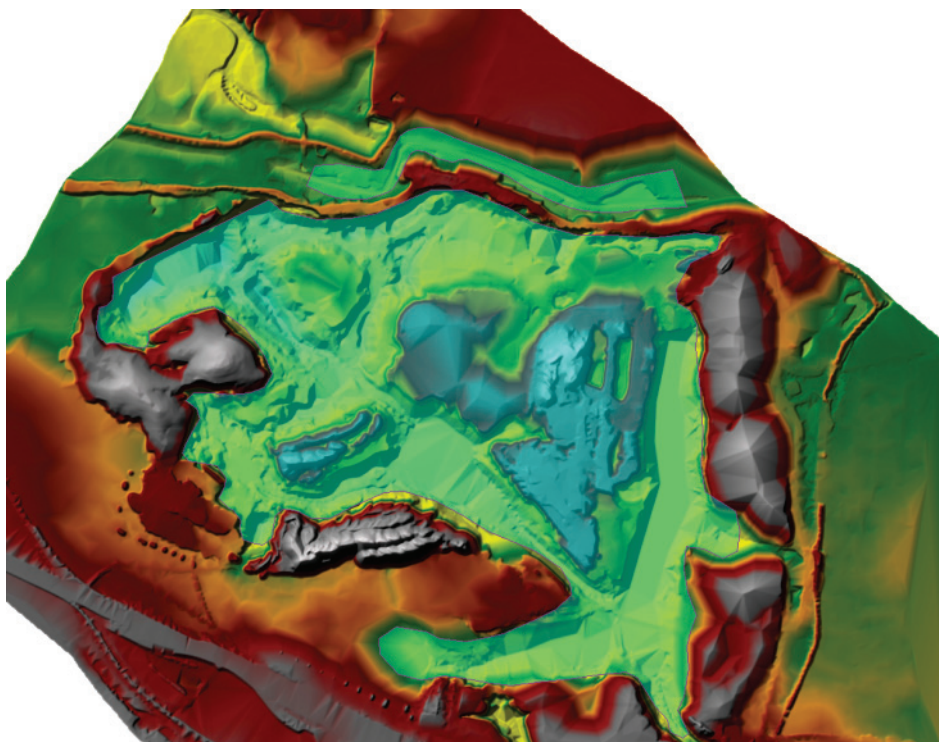


Рис. 4. Зоны коэффициентов шероховатости для различных участков (Manning's regions), для русловой части потока и карьерной выемки

Fig. 4. Zones of roughness coefficients for various sites (Manning's regions), for the channel part of the stream and quarry excavation



тывает всю рассматриваемую территорию и служит для определения соотношения между узлами дублирующей сетки и ячейками ординарной сетки, а равно и между ячейками дублирующей сетки и узлами регулярной сетки. Схема гибридной дискретизации, реализованная в HEC-RAS, соединяет в себе использование методов конечных разностей и конечных объемов.

*Методика создания и настройки модели.* В первую очередь, при помощи ГИС пакета SAGA GIS и САПР Civil 3D была подготовлена цифровая модель рельефа исследуемого участка реки на базе материалов аэрофотосъемки и промеров в русле реки и в затопленных горных выработках (рис. 2).

Полученная ЦМР была импортирована в моделирующую систему HEC-RAS версии 5.0.5 с помощью встроенной в систему программы по работе с ГИС данными RAS-Mapper, где с помощью инструментария Geometric data на цифровую модель рельефа была нанесена расчетная сетка 2D ячеек (рис. 3), заданы параметры коэффициентов шероховатости русловой части потока и участка карьерной выемки (рис. 4).

Причем, для задания коэффициентов шероховатости, отдельно для участка русла и карьерной выемки, использовалась функция Manning's region, которая реализует введение параметров шероховатости в границах заданной границы (региона). Подробная информация по выбору коэффициентов шероховатости русел, пойм и других поверхностей представлена в руководстве [27]. В рассматриваемой модели для русловой части водотока был задан коэффициент шероховатости, равный 0,025 (естественные земляные русла), для карьерной выемки – 0,065 (что соответствует скалистым и порожи-стым руслам с большими уклонами), для всех остальных отдельно не выделенных областей – 0,06 (эквивалентен сильно заросшим поймам рек с зарослями кустарниковой растительности).

*Входные данные для модели (начальные условия).* В связи с тем, что в 11 км выше рассматриваемого участка расположено Беловское водохранилище, – сток р. Иня зарегулирован. По информации Кузбасского филиала ОАО «Кузбассэнерго» «Беловская ГРЭС» – величина расчетного расхода воды 1 % обеспеченности при сбросе из водохранилища составляет 315 м<sup>3</sup>/с.

На участке р. Иня от нижнего бьефа плотины до исследуемого участка имеется лишь один относительно крупный приток – р. Бачат, которая впадает слева на 538 км от устья и имеет расчетную площадь водосбора, равную 1720 км<sup>2</sup> [28].

При разработке модели автором был предложен сценарий, при котором пик половодья на р. Иня, формирующийся с водосборной площади ниже Беловского водохранилища, совпадает с его максимальными попусками 1 % вероятности превышения. Таким образом, расчетный расход 1 % обеспеченности р. Иня на рассматриваемом участке будет складываться из расчетного расхода воды 1 % обеспеченности на сбросе Беловского водохранилища и

расхода воды 1 % обеспеченности р. Бачат в ее устьевой части. Так как для р. Иня в годовом ходе водного режима наибольшие величины стока формируются в период весеннего половодья, расчет будет производиться для фазы весеннего половодья.

Расчетные максимальные расходы воды весеннего половодья определены согласно п. 7.28 СП 33–101–2003. Результаты расчета максимальных расходов весеннего половодья приведен в табл. 1.

*Таблица 1. Результаты расчета максимальных расходов воды весеннего половодья, м<sup>3</sup>/с*

*Table 1. Results of calculating the maximum water flow in spring high water, m<sup>3</sup>/s*

Водотоки Streams	Обеспеченность расхода, % Расход воды, м <sup>3</sup> /с Occurrence of water flow, % Water flow, m <sup>3</sup> /s				
	1	2	3	5	10
р. Бачат the Bachat river	267	245	228	206	178

Таким образом, суммарный расход воды р. Иня 1 % обеспеченности при предложенном неблагоприятном сценарии на рассматриваемом участке, с учетом попусков с Беловского водохранилища и максимального стока р. Бачат, составит 582 м<sup>3</sup>/с.

В качестве гидрографа, задаваемого в модели, был принят гидрограф, смоделированный по методике, описанной в СП 33–101–2003. В качестве гидрографа-модели при этом использовался реальный гидрограф р. Иня по данным водомерного поста г. Ленинск-Кузнецкий за наиболее многоводный 1966 г. [29]. Выборка гидрографа-модели осуществлялась автором из имеющихся в его распоряжении данных за период наблюдений с 1962 по 2005 гг. Выбор гидрографа-модели обусловлен тем, что гидрологический пост в г. Ленинск-Кузнецкий расположен ниже Беловского водохранилища и наилучшим образом описывает режим стока на данном участке реки. Смоделированный и заданный в качестве одного из граничных условий гидрограф весеннего половодья показан на рис. 5.

*Калибровка модели и граничные условия.* В качестве граничных условий по руслу реки Иня на входном створе был задан расчетный гидрограф стока, а на замыкающем – уклон водной поверхности, на данном участке составляющий 0,0002 (0,2 ‰). Также в качестве граничного условия была задана существующая защитная дамба, построенная с целью защиты горной выработки от затопления водами р. Иня (рис. 6).

Калибровка модели производилась по измеренному расходу и уровню воды р. Иня, сравнению измеренных данных с полученными по модели в одном и том же створе и подбору таких коэффициентов шероховатости, при которых получаемая в результате моделирования отметка уровня воды будет как можно ближе к измеренной при данном расходе воды. Вследствие такой калибровки автором получены результаты, приведенные в табл. 2.

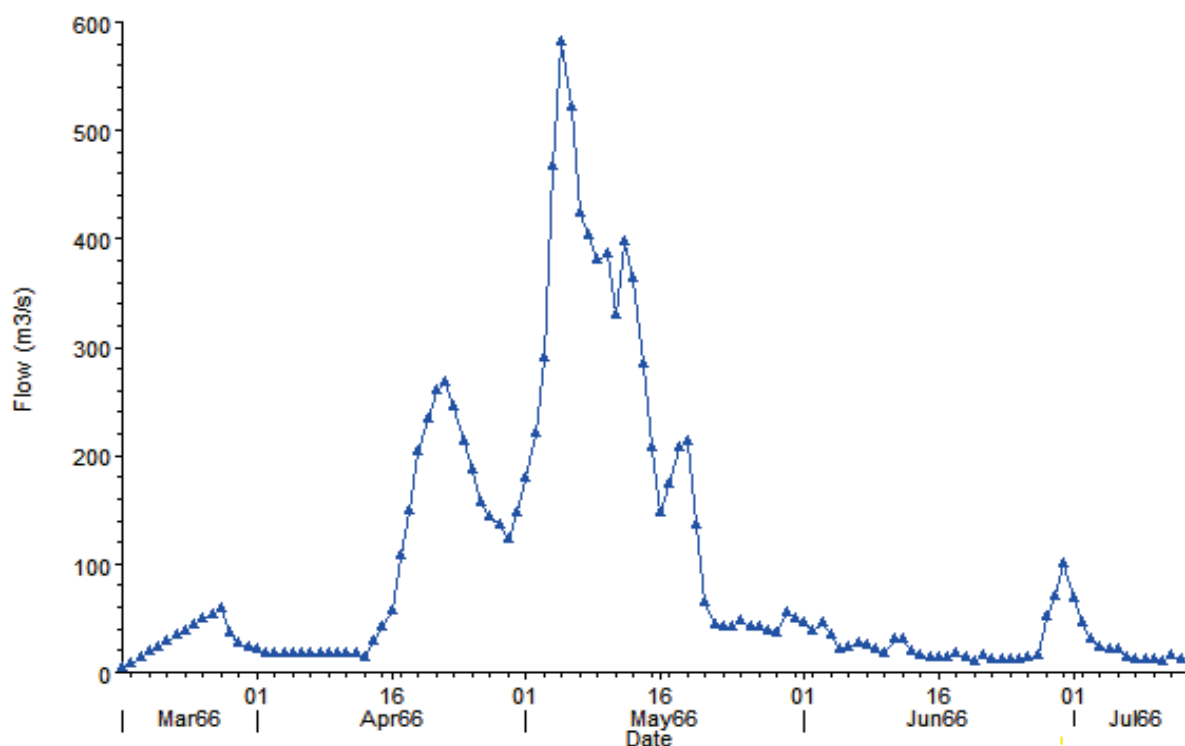


Рис. 5. Используемый для гидравлической модели смоделированный гидрограф половодья р. Инья на рассматриваемом участке

Fig. 5. Modeled hydrograph of the Inya river flood in the area under consideration used for the hydraulic model

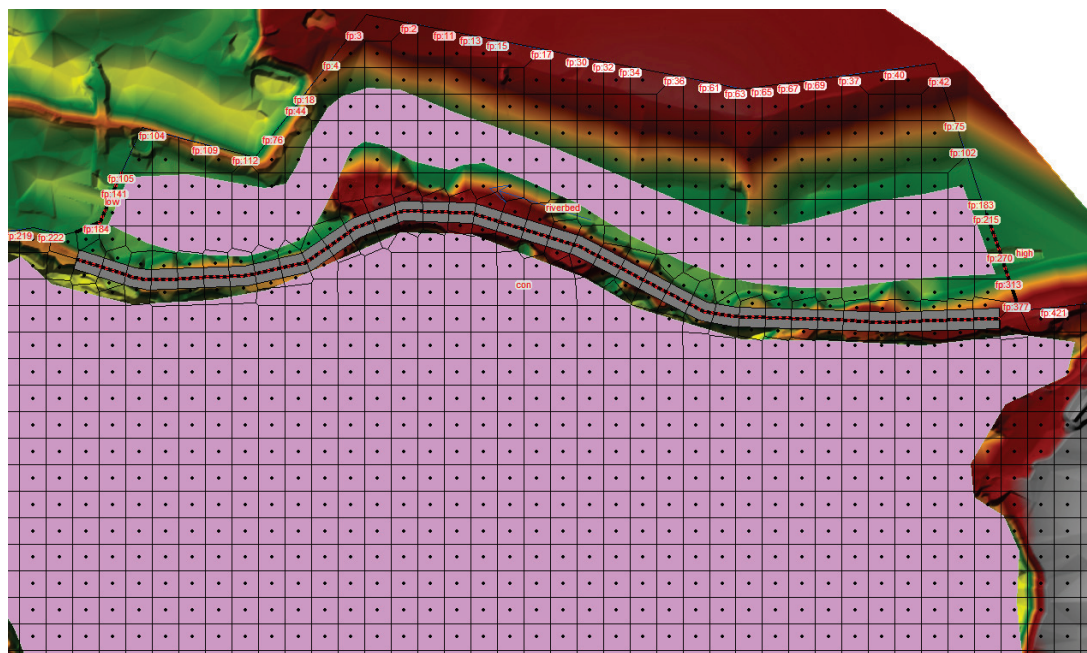


Рис. 6. Заданная в качестве граничного условия существующая защитная дамба (показана серой линией)

Fig. 6. Existing protective dam (shown by the gray line) defined as a boundary condition

Как следует из результатов сравнения, расхождение смоделированных величин с реально наблюдаемыми уровнями составило 0,23 м. Стоит принять во внимание, что измерение расхода воды производилось 16.05.2018 г., на спаде половодья, поэтому на качество смоделированной величины уровня

сильно влияет качество исходной ЦМР. Автором было сделано предположение о том, что при существенно больших расходах воды, таких как расчетный 1 % расход, влияние мелких артефактов и неточностей исходной ЦМР будет играть все меньшую роль по мере нарастания расхода воды и энергии потока.

**Таблица 2.** Результаты сравнения смоделированных расходов и уровней воды с реально наблюдаемыми

**Table 2.** Results of comparison of the modeled water flow and water levels with those actually observed

Расход воды наблюден- ный, м <sup>3</sup> /с Observed wa- ter flow, m <sup>3</sup> /s	Отметка наблюденого уровня воды, м БС Mark of the obser- ved water level, m BS	Расход воды смоделиро- ванный, м <sup>3</sup> /с Modeled wa- ter flow, m <sup>3</sup> /s	Отметка смодели- рованного уровня воды, м БС Mark of the mode- led water level, m BS
10,94	176,48	10,94	176,61

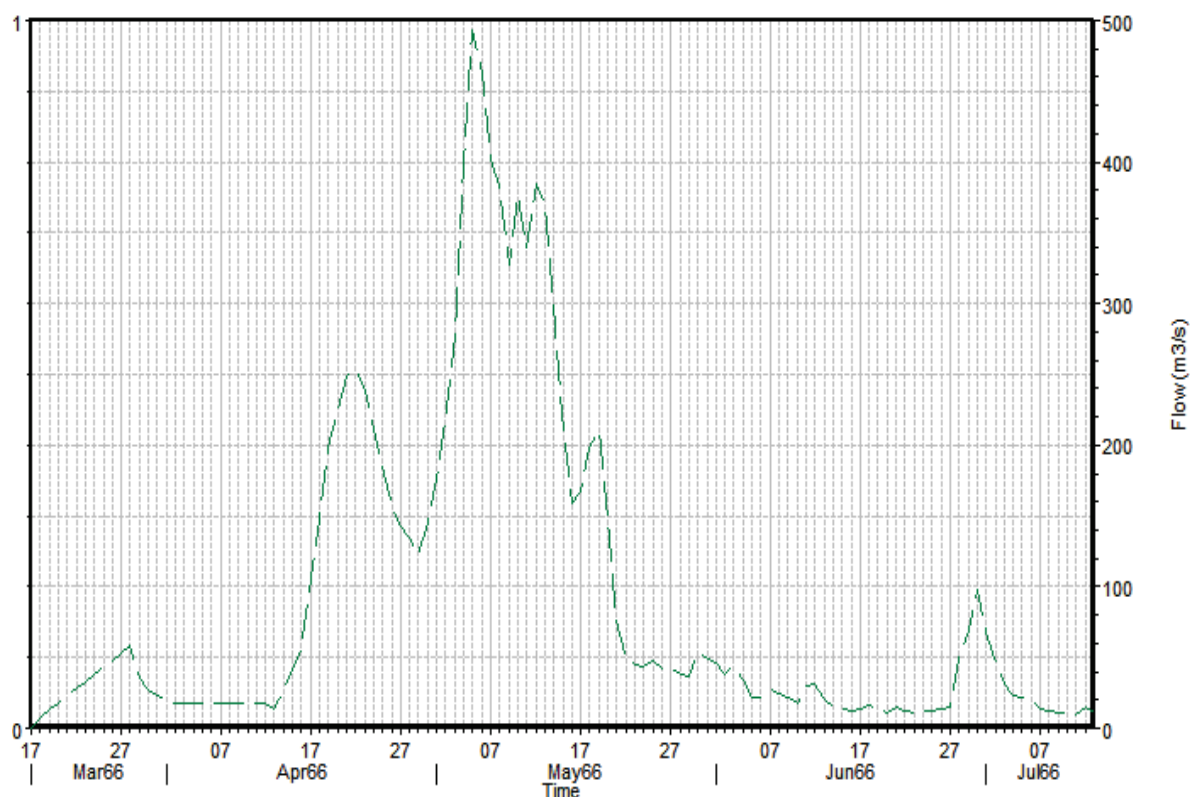
В качестве результата расчетов были получены следующие данные:

- гидрограф стока в замыкающем створе с учетом его трансформации и потерь части стока при переливе через защитную дамбу в карьерную выемку (определяющихся как разница между расходом воды, ушедшим в горную выработку, и начальными условиями) (рис. 7);
- максимальная зона затопления р. Иня и прилегающей к ней отработанной карьерной выемки (рис. 8);
- расчетное поле глубин потока и карьерной выемки (рис. 9);
- распределение направлений течения и расчетное поле значений скоростей потока с локализацией зон перелива воды через защитную дамбу (рис. 10).

При повышении расходов и уровней воды в реке Иня на рассматриваемом участке и выходе ее из берегов ширина потока увеличивается до тех пор, пока с правой стороны река не упрется в коренной берег, а слева в дамбу, защищающую отработанную карьерную выработку от попадания речных вод. Далее поток движется в условиях его стеснения, при этом возрастают скорости и уровни воды. Так, например, в работе [30] была произведена оценка эффективности противопаводковой дамбы на реке Томь в районе г. Междуреченска. Моделирование гидрологических процессов производилось с применением программного комплекса «River» (авт. В.В. Беликов и др.) и ГИС-технологий. Результатом оценки явился вывод о том, что повышение уровня воды за счет стеснения живого сечения потока телом дамбы при ее наращивании может достигать 0,5 м.

В рассматриваемой модели расчетной зоны затопления р. Иня на участке рекультивации выявлены две зоны, в которых возможен перелив воды в емкость отработанной карьерной выемки при рассмотренном сценарии. Данные зоны выявлены посредством локализации областей в пределах дамбы, где резко возрастают скорости потока и вектора направлений течения меняют свое направление на ортогональное к дамбе.

Превышение расчетных отметок уровня воды над гребнем дамбы при переливе укладывается в



**Рис. 7.** Гидрограф стока в замыкающем створе с учетом его трансформации и потерь части стока при переливе через защитную дамбу в отработанную карьерную выемку

**Fig. 7.** Flow hydrograph at the outflow cross-section taking into account flow transformation and loss during overflow through the protective dam into the abandoned quarry



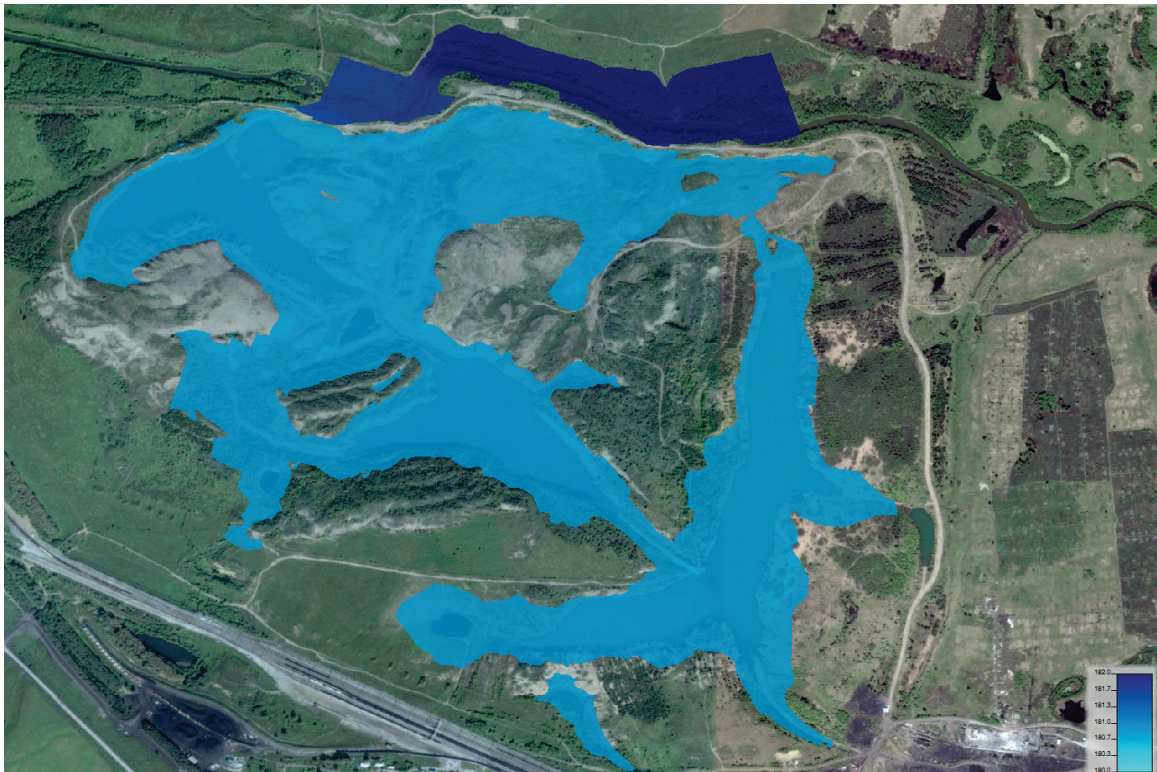


Рис. 8. Максимальная зона затопления р. Иня (синий цвет) и прилегающей к ней отработанной карьерной выемки (голубой цвет)  
 Fig. 8. Maximum flood zone of the Inya river (blue color) and the adjacent quarry excavation (light blue color)



Рис. 9. Расчетное поле глубин при максимальном уровне воды р. Иня и в карьерной выемке  
 Fig. 9. Calculated depth field at the maximum water level of the Inya river and in the quarry excavation area



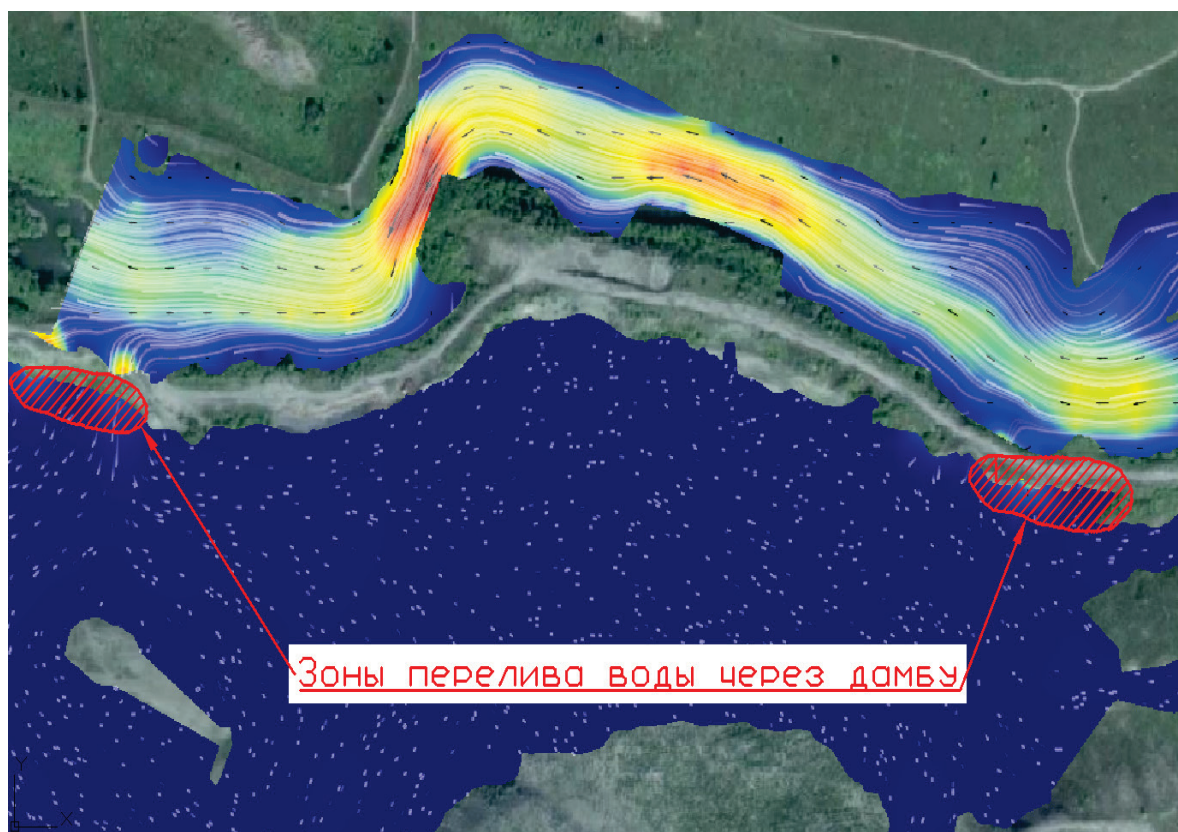


Рис. 10. Локализация зон перелива воды через защитную дамбу и распределение направлений течений (белые линии), скоростных векторов (черные стрелки) в плане

Fig. 10. Localization of zones of water overflow through a protective dam and distribution of directions of flows (white lines), velocity vectors (black arrows) in plan

0,10–0,20 м от отметки ее гребня. Однако этого может быть достаточно, чтобы за переливом последовал размыв и прорыв земляной дамбы. По двум выявленным участкам рекомендованы мероприятия по укреплению откосов и подсыпке дамбы на всем протяжении.

В заключение стоит отметить, что моделирующая система HEC-RAS поколения 5 показала себя в довольно выгодном свете по сравнению с версиями предыдущего поколения 4. Особенно заметны улучшения в плане реализации алгоритмов расчета и интерфейсов в работе с 2D моделями. С недавнего времени в функционал версии 5.0.5 добавлены инструменты моделирования и учета различных гидротехнических сооружений (дамб, водопропускных сооружений и др.) в 2D режиме, что в большинстве случаев позволяет вообще отказаться от использования 1D моделирования. Работа в режиме 2D моделирования позволяет, имея ЦМР, вносить в нее корректировки (добавлять результаты русловых съемок в ЦМР, снятую без рельефа русла реки), встраивать напрямую в поверхность новые объекты (проектируемые дамбы, отвалы, промплощадки или горные выработки), добавлять в модель гидротехнические сооружения, учитывать коэффициенты шероховатости в виде областей (полигонов). В качестве дополнительных ин-

струментов, облегчающих работу и представление результатов, стоит отметить возможность добавления различных растровых и векторных слоев, спутниковых снимков и карт, многие из которых доступны в онлайн библиотеке, а также возможность быстрого вычерчивания продольных и поперечных профилей с нанесением расчетного уровня воды по заданным пользователем направлениям и т. д. Из функциональных недостатков можно отметить отсутствие истинной 3D визуализации, сильную чувствительность к некорректно заданной величине расчетной ячейки и временного шага при отсутствии обратной связи с пользователем (программа не даст знать, что значения подобраны неверно), что может давать значительные погрешности, в связи с чем необходима обязательная калибровка модели по эмпирически полученным параметрам, а также определенный опыт работы с данным ПО.

#### Выводы

1. Автором отмечено, что при решении задачи моделирования расчетных зон затопления рек в мировой и отечественной инженерной и научной практике наиболее распространенными подходами являются *геометрический* и *гидравлический*.

2. Оба рассмотренных подхода эффективно решают задачу моделирования зон затопления, но имеют определенные ограничения по использованию.
3. Геометрический подход может быть использован при решении рассматриваемой задачи, однако дает удовлетворительные результаты лишь в узком спектре задач и имеет существенные ограничения по применению, не учитывает реальных физических процессов при движении потока (коэффициенты шероховатости, вязкость жидкости, силы инерции и т. д.), однако менее прихотлив в отношении исходных данных и вычислительных мощностей.
4. Гидравлический подход может быть использован при решении более широкого спектра задач моделирования, он наиболее точно описывает

физическую суть гидродинамических процессов, учитывает различные режимы движения жидкости, однако достаточно требователен в отношении количества и качества исходных данных, а также вычислительных мощностей ЭВМ, более дорогой.

5. Применение численных методов моделирования расчетных зон затопления рек с использованием современных ГИС технологий и моделирующих систем, в том числе свободно распространяемых, таких как HEC-RAS, позволяет более детально изучать происходящие при наводнениях процессы, выявлять опасные с этой точки зрения зоны, а также давать более обоснованные рекомендации по инженерной защите проектируемых объектов или проведению дополнительных, более детальных изысканий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: ИЦ «Академия», 2010. – 304 с.
2. Dingman L. Physical hydrology. Third edition. – Long Grove, Illinois: Waveland press, Inc., 2015. – 643 с.
3. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – М.: Минстрой России, 2016. – 160 с.
4. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой РФ, 2003. – 73 с.
5. US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River analysis system // Hydraulic reference manual. Version 5.0. – 2016. – 547 p.
6. US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River analysis system // 2D Modeling user's manual. Version 5.0. – 2016. – 171 p.
7. Сиразетдинова Д.Д., Клеин А.Н., Абдуллин А.Х. Моделирование затопления территорий с использованием Arcgis PRO // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2017. – № 1 (4). – С. 195–199.
8. Чечин А.В., Анисимова Э.С. Моделирование зон затопления с использованием геоинформационных систем для оценки ущерба объектам недвижимости // Великие реки 2015: Труды конгресса 17-го Международного научно-промышленного форума. в 3-х т. – Нижний Новгород, 2015. – С. 467–468.
9. Голубева А.Б. Зоны затопления для равнинных рек Алтайского края, расчет ущербов и анализ рисков // Известия АО РГО. – 2015. – № 4 (39). – С. 43–48.
10. Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Моделирование зон затопления при образовании ледового покрова на реках с помощью ГИС-технологий (на примере с. Бобровка и пос. Усьва Пермского края) // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края. Сборник научных трудов. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2013. – С. 41–55.
11. Методика составления цифровых карт глубин затопления дорожно-транспортных сетей паводковыми водными потоками / Д.В. Филиппов, И.Н. Чурсин, В.Н. Орлянкин, И.А. Бубер // Заметки ученого. – 2016. – № 9 (15). – С. 78–84.
12. EarthExplorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 28.01.2019).
13. Олудина О.В., Шигапов И.С. Определение опасных для застройки зон в долине р. Киндерка (г. Казань) // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 10–3 (64). – С. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.64.045>.
14. Hartnett M., Nash S. High-resolution flood modeling of urban areas using MSN\_Flood // Water Science and Engineering. – 2017. – № 10 (3). – P. 175–183.
15. Yongzhi L., Wenting Z., Xinmin C. Flood emergency management using hydrodynamic modelling // Procedia Engineering. – 2012. – V. 28. – P. 750–753. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.802> (дата обращения 28.01.2019).
16. Use of GIS-environment under the Analysis of the Managerial Solutions for Flood Events Protection Measures / A. Nikonorov, V. Badenko, V. Terleev, I. Togo, Yu. Volkova, O. Skvortsova, O. Nikonova, S. Pavlov, W. Mirschel // Procedia Engineering. – 2016. – V. 165. – P. 1731–1740. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.916> (дата обращения 28.01.2019).
17. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5 / V. Moya Quiroga, S. Kure, K. Udo, A. Manno // RIBAGUA – Revista Iberoamericana del Agua. – 2016. – V. 3. – Iss. 1. – P. 25–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001> (дата обращения 28.01.2019).
18. Первая компьютерная модель течений в межгорной котловине при сбое ледниково-подпрудного озера (на примере Курайской котловины, Горный Алтай) / Н.Г. Инишев, А.Н. Рудой, В.А. Земцов, Д.А. Вершинин // Доклады Академии Наук. – 2015. – Т. 461. – № 2. – С. 220–222.
19. Improving the TanDEM-X Digital Elevation Model for flood modelling using flood extents from Synthetic Aperture Radar images / D. Mason, M. Trigg, J. Garcia-Pintado, H. Cloke, J. Neal, P. Bates // Remote Sensing of Environment. – 2016. – V. 173. – P. 15–28. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.018> (дата обращения 28.01.2019).
20. Коротин А.С., Попов Е.В. Оценка точности цифровых моделей рельефа, применяемых для территориальных исследований // Графикон 2015. Труды Юбилейной 25-й Международной научной конференции. – Нижний Новгород, 2015. – С. 102–106.
21. Alonso R., Santillana M., Dawson C. On the diffusive wave approximation of the shallow water equations // Journal of applied mathematics. – 2008. – V. 19. – P. 575–606. URL: <https://doi.org/10.1017/S0956792508007675> (дата обращения 28.01.2019).
22. Feng K., Molz F. A 2-D, diffusion-based, wetland flow model // Journal of Hydrology. – 1997. – V. 196. – Iss. 1–4. – P. 230–250. URL: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03282-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03282-9) (дата обращения 28.01.2019).
23. Candy A. An implicit wetting and drying approach for non-hydrostatic baroclinic flows in high aspect ratio domains // Advances in Water Resources. – 2017. – V. 102. – P. 188–205. URL: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.02.004> (дата обращения 28.01.2019).
24. Casulli V. Semi-implicit finite difference methods for the two-dimensional shallow water equations // Journal of Computational

- Physics. – 1990. – V. 86. – Iss. 1. – P. 56–74. URL: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(90\)90091-E](https://doi.org/10.1016/0021-9991(90)90091-E) (дата обращения 28.01.2019).
25. Balzano A. Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models // Coastal Engineering. – 1998. – V. 34. – Iss. 1–2. – P. 83–107. URL: [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(98\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(98)00015-5) (дата обращения 28.01.2019).
26. Casulli V. Semi-implicit subgrid modelling of three dimensional free-surface flows // International journal for numerical methods in fluids. – 2011. – V. 67. – Iss. 4. – P. 441–449. URL: <https://doi.org/10.1002/fld.2361> (дата обращения 28.01.2019).
27. Arcement G., Schneider V. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. U.S. Geological survey water-supply paper 2339. – U.S.: Government printing office, 1989. – 38 p.
28. Панина Н.А. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 98 с.
29. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1966 г. – Новосибирск: МСС Госгидромета, 1968. – Т. 6. – Вып. 0–3. – 535 с.
30. Сазонов А.А., Крыленко И.Н., Головлев П.П. Оценка эффективности противопаводковых дамб с помощью методов математического моделирования (на примере реки Томь у города Междуреченска) // Природообустройство. – 2015. – № 4. – С. 73–76.

*Поступила 04.02.2019 г.*

#### **Информация об авторах**

**Романовский Р.В.**, руководитель группы инженерно-гидрометеорологических изысканий ОАО «Кузбассгипрошахт».



UDC 556.5.072

## APPLICATION OF COMPUTER MODELING METHODS OF FLOOD ZONES AT MAXIMUM DESIGN WATER LEVELS FOR SOLVING PROJECT TASKS IN THE DISTURBED LANDS RECLUTIVATION AND DESIGN OF BUILDINGS AND FACILITIES NEAR WATER BODIES

Roman V. Romanovskiy,  
keny146@gmail.com

Hydrometeorological Survey Group for JSC Kuzbassgiproshakht,  
34, N. Ostrovskiy street, Kemerovo, 650000, Russia.

**The relevance** of modeling zones of maximum flooding of rivers (flood zones) during engineering surveys for design and construction of economic activity objects, development of projects for the disturbed lands recultivation in the zones of direct impact of water bodies is related to the fact that under current conditions, with ever-increasing requirements for security and business continuity of the projected facilities, the existing methods for assessing the risk of flooding do not always give a satisfactory result in order to fully assess whether there is a risk for the projected facility or not.

**The main aim** of the research is to analyze domestic and foreign experience in modeling flood zones at maximum river water levels for practical solution of problems of engineering design, to assess advantages and disadvantages of the main approaches in the practice of surveys, to demonstrate the possibilities of modeling method for solving a particular engineering problem.

**Methods.** The method of spatial data analysis for creating a digital terrain model via geoinformation systems was used for preparing initial data; the method of numerical simulation of the Inya river flood zone and the abandoned quarry excavation located on the left bank as part of the works on preparation of the project for the disturbed lands recultivation was used to calculate the maximum flood zone. Numerical modeling was carried out using HEC-RAS simulation system, ver. 5.0.5.

**Results.** The author has carried out the review of the existing worldwide and domestic practice of numerical modeling of flood zones for rivers when solving the problems in the field of engineering design. The paper introduces the author's own model of the calculated flood zone on the example of the recultivation site «Mokhovskoye pole». The example of assessment of the impact on the recultivated object when implementing the most negative scenario (probable flooding of the pit in the period of the maximum water flow of 1 % occurrence) was shown, the advantages and disadvantages of applying different approaches in practice were described.

### Key words:

Geoinformation systems, numerical modeling of the flood zones of rivers, 2D modeling, digital elevation model, remote sensing data, modeling systems, HEC-RAS.

### REFERENCES

1. Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii*: [Mathematical modeling in hydrology]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 304 p.
2. Dingman L. *Physical hydrology*. Long Grove, Illinois, Waveland press, Inc., 2015. 643 p.
3. SP 47.13330.2016. *Inzhenernyye izyskaniya dlya stroitelstva. Osnovnyye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 11-02-96* [Engineering surveys for construction. Basic provisions. Updated version of SNiP 11-02-96]. Moscow, Ministry of Construction of the RF Publ., 2016.
4. SP 33-101-2003. *Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of design hydrological performance]. Moscow, Gosstroy RF Publ., 2003. 73 p.
5. US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River analysis system. *Hydraulic reference manual. Version 5.0.*, 2016. 547 p.
6. US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River analysis system. *2D Modeling user's manual. Version 5.0.*, 2016. 171 p.
7. Sirazetdinova D.D., Klein A.N., Abdullin A.Kh. Modeling of flooding of territories using Arcgis PRO. *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya*, 2017, no. 1 (4), pp. 195–199. In Rus.
8. Chechin A.V., Anisimova E.S. Modelirovanie zon zatopeniya s ispolzovaniem geoinformatsionnykh sistem dlya otsenki ushcherba obektam nedvizhimosti [Modeling flood zones using geoinformation systems to assess damage to real estate objects]. *Trudy kongressa 17-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma. Velikie reki 2015* [Proc. of the Congress of the 17<sup>th</sup> International Scientific and Industrial Forum. Great Rivers 2015]. Nizhniy Novgorod, 2015. pp. 467–468.
9. Golubeva A.B. Zones of flooding for the flat rivers of the Altai Territory, calculation of damages and risk analysis. *Izvestiya AO RGO*, 2015, no. 4 (39), pp. 43–48. In Rus.
10. Shikhov A.N., Abdullin R.K. Modelirovanie zon zatopeniya pri obrazovanii ledovogo pokrova na rekakh s pomoshchyu GIS-tekhnologiy (na primere s. Bobrovka i pos. Usva Permskogo kraja) [Modeling of flooding zones in ice cover formation on rivers with the help of GIS-technologies (on the example of Bobrovka and Usva settlements, Perm Krai)] *Geoinformatsionnoe obespechenie prostranstvennogo razvitiya Permskogo kraja. Sbornik nauchnykh trudov* [Geoinformation support for spatial development of Perm Krai. Collection of scientific papers]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2013. pp. 41–55.
11. Filippov D.V., Chursin I.N., Orlyankin V.N., Buber I.A. Methodology of compilation of digital maps of flood depths of road and transport networks by flooding water flows. *Zametki uchenogo*, 2016, no. 9 (15), pp. 78–84. In Rus.
12. *EarthExplorer*. Available at: <https://www.earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 28 January 2019).
13. Oludina O.V., Shigapov I.S. Identification of hazardous areas for development in the valley of the Kinderka river (Kazan). *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2017, no. 10–3 (64), pp. 51–56. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.64.045>.
14. Hartnett M., Nash S. High-resolution flood modeling of urban areas using MSN Flood. *Water Science and Engineering*, 2017, no. 10 (3), pp. 175–183.
15. Liu Y., Zhang W., Cui X. Flood emergency management using hydrodynamic modelling. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 28, pp. 750–753. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.802> (accessed 28 January 2019).
16. Nikonorov A., Badenko V., Terleev V., Togo I., Volkova Y., Skvortsova O., Nikonova O., Pavlov S., Mirschel W. Use of GIS-environment under the Analysis of the Managerial Solutions for Flood Events Protection Measures. *Procedia Engineering*, 2016,



- vol. 165, pp. 1731–1740. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.916> (accessed 28 January 2019).
17. Moya Quiroga V., Kure S., Udo K., Mano A. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RI-BAGUA – Revista Iberoamericana del Agua*, 2016, vol. 3, Iss. 1, pp. 25–33. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001> (accessed 28 January 2019).
18. Inishev N.G., Rudoi A.N., Zemtsov V.A., Vershinin D.A. The first computer model of currents in the intermontane basin when discharging the glacial-pond lake (on the example of Kuraisk depression, Gorniy Altai). *Doklady Akademii Nauk*, 2015, vol. 461, no. 2, pp. 220–222.
19. Mason D., Trigg M., Garcia-Pintado J., Cloke H., Neal J., Bates P. Improving the TanDEM-X Digital Elevation Model for flood modelling using flood extents from Synthetic Aperture Radar images. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 173, pp. 15–28. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.018> (accessed 28 January 2019).
20. Korotin A.S., Popov E.V. Otsenka tochnosti tsifrovyykh modeley relefa, primenyaemykh dlya territorialnykh issledovaniy [Evaluation of the accuracy of digital elevation models used for territorial research]. *Grafikon 2015. Trudy Yubileynoy 25-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Graphicon 2015. Proc. of the Jubilee 25<sup>th</sup> International Scientific Conference]. Nizhniy Novgorod, 2015. pp. 102–106.
21. Alonso R., Santillana M., Dawson C. On the diffusive wave approximation of the shallow water equations. *Journal of applied mathematics*, 2008, vol. 19, pp. 575–606. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0956792508007675> (accessed 28 January 2019).
22. Feng K., Molz F. A 2-D, diffusion-based, wetland flow model. *Journal of Hydrology*, 1997, vol. 196, Iss. 1–4, pp. 230–250. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03282-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03282-9) (accessed 28 January 2019).
23. Candy A. An implicit wetting and drying approach for non-hydrostatic baroclinic flows in high aspect ratio domains. *Advances in Water Resources*, 2017, vol. 102, pp. 188–205. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.02.004> (accessed 28 January 2019).
24. Casulli V. Semi-implicit finite difference methods for the two-dimensional shallow water equations. *Journal of Computational Physics*, 1990, vol. 86, Iss. 1, pp. 56–74. Available at: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(90\)90091-E](https://doi.org/10.1016/0021-9991(90)90091-E) (accessed 28 January 2019).
25. Balzano A. Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models. *Coastal Engineering*, 1998, vol. 34, Iss. 1–2, pp. 83–107. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(98\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(98)00015-5) (accessed 28 January 2019).
26. Casulli V. Semi-implicit subgrid modelling of three dimensional free-surface flows. *International journal for numerical methods in fluids*, 2011, vol. 67, Iss. 4, pp. 441–449. Available at: <https://doi.org/10.1002/fld.2361> (accessed 28 January 2019).
27. Arcement G., Schneider V. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. *U.S. Geological survey water-supply paper 2339*. U.S. Government printing office, 1989. 38 p.
28. Panina N.A. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Resources of the USSR surface waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 98 p.
29. *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi 1966 g.* [Annual data on the regime and resources of surface waters of the land, year 1966]. Novosibirsk, MSS Gosgidromet, 1968. Vol. 6, Iss. 0–3, 535 p.
30. Sazonov A.A., Krylenko I.N., Golovlev P.P. Assessment of the effectiveness of flood control dams using mathematical modeling methods (on the example of the Tom river in the city of Mezhdurechensk). *Prirodoobustroystvo*, 2015, no. 4, pp. 73–76. In Rus.

Received: 4 February 2019.

#### Information about the authors

**Roman V. Romanovskiy**, Head of Engineering Hydrometeorological Survey Group for JSC Kuzbassgiproshtakht.

УДК 65.011.56

## ПОДХОД К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ФОРМИРОВАНИЮ НОРМ ВРЕМЕНИ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СРЕДСТВ КИПиА, АСУ ТП И СООРУЖЕНИЙ СВЯЗИ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Савельев Алексей Олегович<sup>1</sup>,  
sava@tpu.ru

Комагоров Владимир Петрович<sup>1</sup>,  
komagorov@tpu.ru

Михалевич Сергей Сергеевич<sup>1</sup>,  
mihalevichss@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью постоянного обновления и пересмотра стратегии повышения общей экономической эффективности предприятий нефтегазовой отрасли путем оптимизации затрат на проведение мероприятий технического обслуживания критически важных контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), оборудования автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) и сооружений связи.

**Цель:** разработать научно обоснованный подход к автоматизированному формированию норм времени на техническое обслуживание оборудования КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи предприятий нефтегазодобывающей отрасли, позволяющий сократить время и повысить общую эффективность процесса планирования технического обслуживания.

**Объекты:** технологические установки добычи нефти и газа, подготовки, перекачки и хранения нефти и газа, поддержания пластового давления, трубопроводного транспорта, контролируемые и управляемые с помощью оборудования АСУ ТП, оснащенные различными приборами КИПиА; сооружения связи: радиорелейные и спутниковые системы связи, проводные системы связи, волоконно-оптические линии связи, телефонные станции, транковые системы связи, системы видеонаблюдения и сигнализации.

**Методы.** Для автоматизации процесса формирования норм трудозатрат на техническое обслуживание нового оборудования используется метод классификации оборудования по категориям технической сложности.

**Результаты.** Разработана методика автоматизированного расчета нормативов трудозатрат на техническое обслуживание оборудования предприятий нефтегазовой отрасли, основанная на категориях технической сложности. Определены требования к модулю формирования базовых норм трудозатрат информационной системы управления техническим обслуживанием, выполнена соответствующая программная реализация. На основе предложенной методики сформированы базовые нормы трудозатрат на техническое обслуживание средств АСУ ТП, КИПиА и сооружений связи ОАО «Томскнефть» ВНК.

### Ключевые слова:

Система управления техническим обслуживанием, стоимость жизненного цикла, стратегии технического обслуживания, автоматизация производства, нормирование трудозатрат.

### Введение

Анализ стоимости жизненного цикла производства является критически важным для промышленных предприятий [1–3]. Результаты анализа используются для выбора оптимальной стратегии повышения общей экономической эффективности производства. При этом расходы на реализацию мероприятий технического обслуживания оборудования являются одним из основных элементов, определяющих итоговую стоимость жизненного цикла продукции (рис. 1) [1, 4]. Разработка надежной и грамотной стратегии планирования и проведения мероприятий технического обслуживания позволяет повысить общую экономическую эффективность производственного процесса.

В обобщенном виде все подходы к техническому обслуживанию и ремонту оборудования могут быть сведены к двум основным: проактивному [5–7] и реактивному [2]. Первый заключается в обеспечении максимально возможного межремонтного срока эксплуатации за счет регулярных

мероприятий обнаружения и исправления причин отказов оборудования. Реактивный подход, напротив, предполагает ремонт и замену оборудования только в случае полной выработки им своего эксплуатационного ресурса. Иными словами, реактивный подход восстанавливает функциональность технической системы, а проактивный – сохраняет её [2].

В зависимости от особенностей производственного процесса и подхода к управлению формируется оптимальный план мероприятий, как правило, сочетающий реактивные и проактивные подходы [8–10]. С учетом того, что стоимость запасных частей и замены оборудования находятся вне зоны влияния промышленного предприятия, грамотное нормирование труда при выполнении операций технического обслуживания является базовым требованием, от которого зависит общая эффективность процесса планирования.

Для предприятий нефтегазовой отрасли ключевыми категориями оборудования, обеспечиваю-

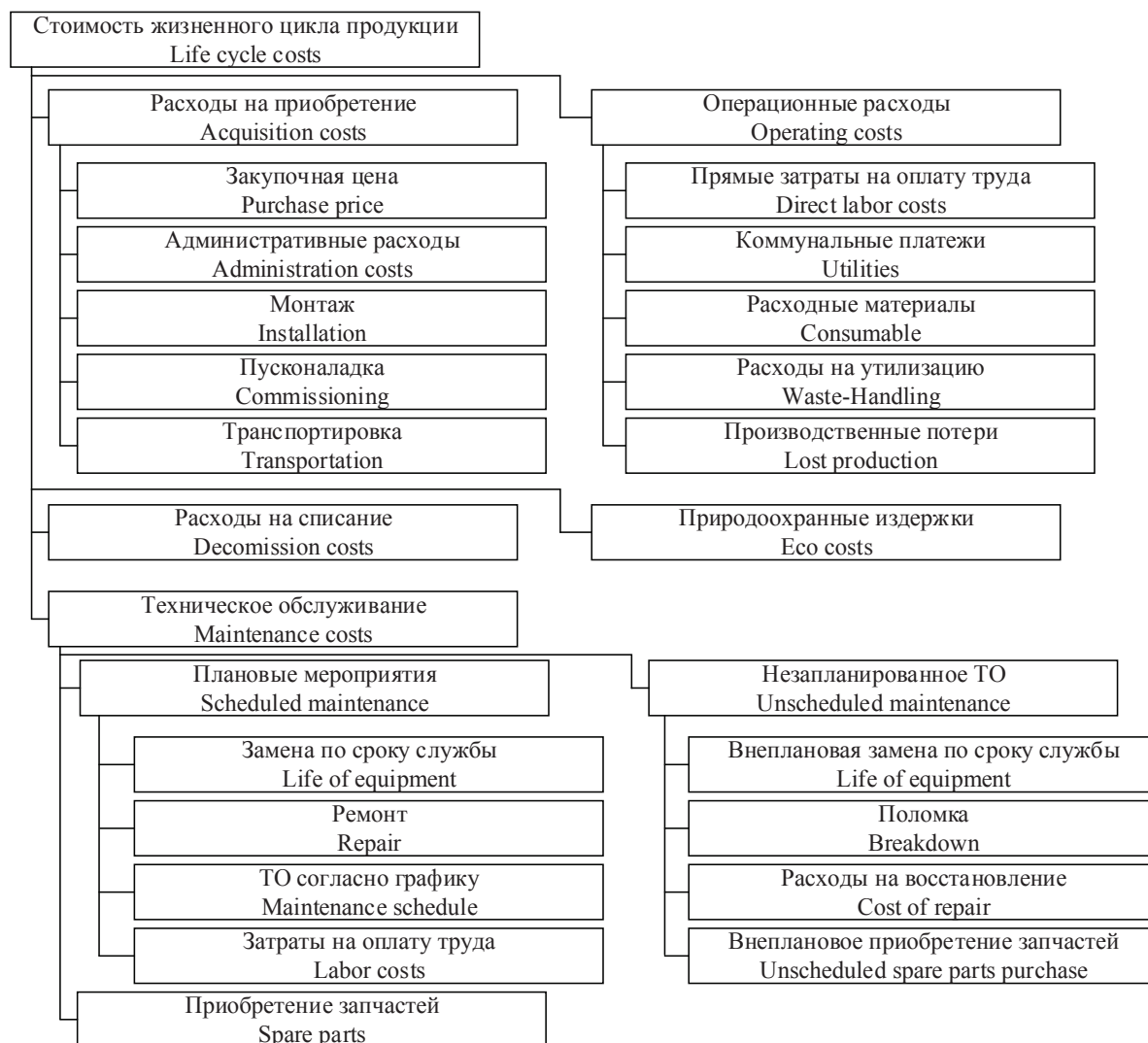


Рис. 1. Основные составляющие стоимости жизненного цикла продукции

Fig. 1. Main components of production life cycle cost

щими возможность оперативного управления производством, являются средства КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи. При этом само предприятие представляет собой сложную, разветвленную структуру регионального масштаба, использующую в своей работе широкую номенклатуру оборудования, которое в свою очередь отличается по характеристикам в рамках устройств одной группы и сходного назначения.

Сложившиеся условия значительно ограничивают возможности нормирования труда при техническом обслуживании: метод фотографии рабочего времени в масштабах организации является дорогостоящим и, что более важно, трудоёмким, использование типовых норм затруднено ввиду постоянной модернизации и совершенствования техники. Таким образом, наиболее адекватным в сложившейся ситуации методом является сравнительное нормирование (или нормирование по аналогии).

Таким образом, актуальной является задача разработки методики автоматизированного формирования норм трудозатрат на выполнение операций технического обслуживания оборудования, учитывающей обозначенные особенности эксплуатации средств КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи предприятий нефтегазовой отрасли.

#### Методология исследований

В рамках разработки подхода к автоматизированному формированию норм времени на техническое обслуживание был проведен анализ следующих основополагающих документов, находящихся в открытом доступе и используемых в нефтегазовой отрасли:

1. Типовые нормы времени на монтаж контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации в нефтяной промышленности [11].
2. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 14 октября 2011 г. N 1175н «Об утверждении Межотраслевых ти-

- повых норм времени на работы по сервисному обслуживанию оборудования телемеханики, сопровождению и доработке программного обеспечения» [12].
3. Укрупненные нормы времени на техническое обслуживание, ремонт и метрологическое обеспечение контрольно-измерительных приборов и автоматики (ОАО «Лукойл» НК, Москва 2013 г.) [13].
  4. Единые нормы времени на монтаж и демонтаж нефтепромыслового оборудования (утвержденные Министерством нефтяной промышленности 29.09.1983) [14].
  5. Доработанный текст проекта Приказа Министерства энергетики РФ «Об утверждении Правил организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей» (подготовлен Минэнерго России 08.08.2017) [15].
  6. Правила эксплуатации и безопасности обслуживания средств автоматизации, телемеханизации и вычислительной техники в газовой промышленности (утверждены министерством газовой промышленности 03.03.1983) [16].
- Также были рассмотрены внутренние регламенты и иные документы, нормирующие операции технического обслуживания, доступ к которым был предоставлен в рамках выполнения научно-исследовательских работ по теме «Разработка и исследование прототипа системы расчета и хранения нормативов трудозатрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования и сооружений связи ОАО «Томскнефть» ВНК» в 2014–2015 гг.:
1. АСУ ТП и средства КИПиА. Нормы времени на техническое обслуживание (Составитель – ОАО «ВНИИОЭНГ», Москва 2005 г.).
  2. Типовые нормы времени на ремонт контрольно-измерительных приборов в нефтяной промышленности (Составитель – ОАО «ВНИИОЭНГ», Москва 2002 г.).
  3. Нормы времени на ремонт нефтепромыслового оборудования (Составитель – ОАО «Томскнефть» ВНК, Стрежевой 2013 г.).
  4. Техническое обслуживание средств измерения, автоматики, телемеханики и АСУ ТП (Составитель – ПАО «НК «Роснефть», Москва 2007 г.).
  5. Техническое обслуживание средств КИПиА. Нормы времени, расхода материалов и транспортных затрат (ОАО «ВНИИОЭНГ»), Москва 2008 г.).
  6. Нормы времени на техническое обслуживание, ремонт и метрологическое обеспечение приборов и оборудования систем измерений количества нефти и нефтепродуктов (ОАО «ВНИИОЭНГ»), Москва 2009 г.).
  7. АСУ ТП и средства КИПиА. Нормы времени на техническое обслуживание (ОАО «ВНИИОЭНГ»), Москва 2005 г.).
  8. Транспортное обслуживание при сервисе. Средства КИПиА и АСУ ТП. Нормы времени (ОАО «ВНИИОЭНГ»), Москва 2007 г.).

9. Типовые нормы времени по техническому обслуживанию средств автоматизации (ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК», Томск 2002 г.).

В каждом из рассмотренных источников содержится подробная информация о регламентах проведения технического обслуживания по группам оборудования и типовым нормам времени на выполнение соответствующих операций. Однако существует ряд сложностей, препятствующих использованию имеющихся регламентов при разработке стратегии технического обслуживания оборудования. Во-первых, основой ряда документов являются нормы времени, разработанные и утвержденные более 15 лет назад, соответственно, не учтенными являются особенности современного оборудования. Во-вторых, документы не содержат алгоритма действий по формированию норм времени для новых вводимых в эксплуатацию моделей. Следует отметить, что, несмотря на указанные недостатки, имеющиеся регламенты и нормы могут быть использованы в качестве базовых, отправных значений.

На основе анализа приведенных источников были сформулированы требования к методике автоматизированного расчета нормативов трудозатрат, а также подобраны соответствующие основные положения и расчетные формулы методики.

#### **Требования к методике расчетов нормативов трудозатрат**

Разрабатываемая методика должна обеспечивать не только создание инструмента расчета базовых норм времени на техническое обслуживание оборудования, но и решение следующего ряда дополнительных задач:

- 1) регламентировать порядок расчета трудозатрат на выполнение технического обслуживания средств АСУ ТП, КИПиА и сооружений связи;
- 2) формировать единый инструмент расчета стоимости работ для любых объектов АСУ ТП, КИПиА и сооружений связи, с учетом возможности появления новых объектов.
- 3) разработать дополнительные инструменты оценки работ: нормативного срока выполнения, нормативного количества исполнителей и нормативной продолжительности по каждому из видов работ;
- 4) спроектировать механизм переутверждения норм и корректирующих коэффициентов.

Решение вышеперечисленных задач потребовало разработки следующих общих положений и допущений:

1. При расчете трудозатрат принимается во внимание то обстоятельство, что продолжительность работ зависит от квалификационного уровня исполнителей.
2. Основой методики и алгоритмов расчета нормативов трудозатрат являются экспертные оценки, сложившиеся в профильных научно-исследовательских институтах. Для уточнения значений предлагается ввести поправочные коэф-



фициенты, значения которых должны определяться эмпирическим путем.

3. Трудозатраты на выполнение работ рассчитываются по составным блокам, на основе базового классификатора работ.
4. Разработанная методика предназначена для вычисления норм в относительно «простых» случаях, без учета форс-мажорных и иных осложняющих обстоятельств. Для регулирования «сложности» работ (в том числе удаленности объекта, температуры окружающего воздуха и т. п.) предлагается использовать дополнительные поправочные коэффициенты.

#### Методика автоматизированного формирования норм трудозатрат

В соответствии с перечнем выявленных требований была разработана методика авторизованного формирования норм трудозатрат на ТО средств КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи, включающая:

- 1) перечень базовых норм, сформированный на основе доступной отраслевой документации [11–17];
- 2) список категорий технической сложности (КТС) оборудования;
- 3) алгоритм расчета базовых норм времени для новых моделей вводимого в эксплуатацию оборудования.

В современных условиях техника и технология постоянно меняются, в течение короткого периода времени происходит процесс модернизации, совершенствования существующей техники. Кроме того, в связи с широкой номенклатурой средств КИПиА, идентичных по конструкции, но имеющих некоторые отличия, нормирование всего спектра средств КИПиА является очень трудоемким и сложным процессом, требующим значительных временных затрат. В связи с этим с целью повышения эффективности использования системы нормативов было бы целесообразно использование переводного коэффициента, в качестве которого возможно применение коэффициента сложности технического обслуживания, характеризующего трудоемкость операций при техническом обслуживании средств КИПиА.

Основные принципы использования подобного коэффициента в области автоматизированных систем управления изложены в системе нормативных документов в строительстве ГЭСНп 81–04–02–2001 [17].

Степень сложности обслуживания средств КИПиА может быть оценена категориями технической сложности. Чем сложнее прибор и выше его основные технологические и метрологические характеристики, тем выше его категория технической сложности. Категория технической сложности присваивается каждой единице оборудования. В табл. 1 приведены характеристики технической сложности средств КИПиА для предприятий нефтегазовой отрасли [17].

Однако простое распределение средств КИПиА по категориям технической сложности исказит реально необходимые нормы времени для различных типов приборов, так как каждый тип имеет различную трудоемкость технического обслуживания, связанную с рядом технических особенностей: сложностью монтажа и демонтажа, количеством исполнительных механизмов, сложностью радиоэлементной базы, расширенной функциональностью и т. д. В связи с этим, на основе уже разработанных нормативов, необходимо: 1) распределить средства КИПиА по группам, отражающим функциональное предназначение прибора (сигнализаторы, уровнемеры, регистраторы и т. п.); 2) в каждой созданной группе присвоить средствам КИПиА категории технической сложности согласно табл. 1.

Первая категория технической сложности для каждой созданной группы по аналогии с ГЭСНп 81–04–02–2001 принимается базовой.

Соответственно,  $H_{вр}^0 = H_{вр}^I$  и  $K_I = 1$ , где  $H_{вр}^0$  – базовая норма времени на техническое обслуживание средств КИПиА, чел/ч;  $H_{вр}^I$  – средняя норма времени на техническое обслуживание средств КИПиА I категории технической сложности, которая определяется в чел/ч по формуле:

$$\dot{I}_{ср}^I = \frac{\sum_{i=1}^n H_{вр,п}^I}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество приборов в рассматриваемой группе, которым присвоена I категория технической сложности, шт.;  $H_{вр,п}^I$  – норма времени на техническое обслуживание  $n$ -го прибора I категории технической сложности в рассматриваемой группе, чел/ч.

По имеющимся нормативам произвести расчет средних приближенных коэффициентов  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  для каждой группы:

$$K_{II} = \frac{H_{ср}^{II}}{H_{ср}^I}, \quad (2)$$

$$K_{III} = \frac{H_{ср}^{III}}{H_{ср}^I}, \quad (3)$$

где  $H_{ср}^{II}$ ,  $H_{ср}^{III}$  – средние нормы времени на техническое обслуживание средств КИПиА II и III категорий технической сложности, рассчитываемые аналогично формуле (1) с соответствующей корректировкой по категориям технической сложности.

В ходе определения коэффициентов и базовой нормы времени могут возникнуть ситуации, при которых невозможно произвести расчеты по формулам (1)–(3). Способы решения подобных трудностей сведены в табл. 2.

При внесении информации по нормам времени для нового средства КИПиА используется следующий алгоритм.

1. Новое средство КИПиА добавляется в ранее созданную группу, отражающую его функцио-

Таблица 1. Категории технической сложности средств КИПиА

Table 1. Technical complexity categories of instrumentation and automation equipment

Категория технической сложности Technical complexity category	Характеристика оборудования Equipment characteristics
$K_I$	Измерительные, регулирующие, преобразующие, передающие на дальние расстояния устройства, электромагнитные, полупроводниковые и другие компоненты, сигнальная арматура и т. п. приборного или аппаратного типов исполнения, характеризующиеся: · простым контролем, измерением параметров состояния технологического объекта; · одноконтурным автоматическим регулированием; · автоматическим одноконтурным логическим управлением (переключения, блокировки и т. п.); · отсутствием предварительной обработки информации; · классом точности ниже или равным 1,0 Measuring, regulating, transforming, long distances transmitting devices, electromagnetic, semiconductor and other components characterized by: · simple control, technological object parameters measurement; · single-loop automatic regulation; · automatic single-ended logic control (switching, blocking, etc.); · lack of information preprocessing; · accuracy class lower than or equal to 1,0
$K_{II}$	Те же устройства и компоненты, что и в I категории, характеризующиеся: · архивированием данных, представлением трендов параметров; · косвенным измерением (вычислением) отдельных показателей функционирования технологического объекта; · наличием программного автоматического регулирования; · автоматическим программным логическим управлением по «жесткому» циклу; · наличием аппаратного программного обеспечения с настройками параметрами, изменение которых производится через специализированные интерфейсные модули переносного персонального компьютера и/или из систем верхнего уровня; · наличием адресных интерфейсных каналов связи с использованием специализированных протоколов обмена информацией; · возможностью прямого измерения нескольких технологических параметров, отличающихся различной природой происхождения сигнала; · классом точности ниже 0,2 и выше 1,0 Category I devices and components, characterized by: · data archiving, trend parameters visualization; · indirect measurement (calculation) of technological object functioning individual indicators; · software automatic control availability; · automatic program logic control; · availability of hardware software with configuration parameters, which are modified through specialized interface modules, a portable personal computer and/or from upper-level systems; · availability of address interface communication channels using specialized information exchange protocols; · possibility of several technological parameters direct measurement that differ in various nature of the signal's origin; · accuracy class below 0,2 and above 1,0
$K_{III}$	Те же устройства и компоненты, что и во II категории, а также закрытые автоматизированные системы управления технологическими процессами, предварительно программируемые «интеллектуальные» логические контроллеры (PLC), массовые расходомеры, характеризующиеся: · возможностью анализа и оценки состояния процесса по его модели (распознавание ситуации, диагностика аварийных состояний); · возможностью управления быстропротекающими процессами в аварийных условиях или управления с адаптацией (самообучением и изменением алгоритмов и параметров); · возможностью оптимального управления установившимися режимами (в статике) и/или переходными процессами (оптимизация в динамике); · классом точности выше или равным 0,2 The same devices and components as in Category II as well as the closed automated control systems of pre-programmed intelligent logic controllers, mass flow meters, characterized by: · ability to analyze and assess the state of the process according to its model (situation recognition, emergency conditions diagnostics); · ability to control fast processes in emergency conditions or management with adaptation (self-learning and changing algorithms and parameters); · possibility of the steady-state regimes (static) and/or transient processes (optimization in dynamics) optimal control; · accuracy class higher than or equal to 0,2

нальное предназначение. При отсутствии таковой создается новая группа.

2. Устройство присваивается КТС методом экспертной оценки или в соответствии с ГЭСНп 81–04–02–2001.
3. Рассчитывают норму времени на техническое обслуживание прибора в зависимости от присвоенной категории технической сложности по следующим формулам:

$$H_{вр}^I = H_{вр}^6; \quad (4)$$

$$H_{вр}^{II} = H_{вр}^6 \cdot K_{II}; \quad (5)$$

$$H_{вр}^{III} = H_{вр}^6 \cdot K_{III}, \quad (6)$$

где  $H_{вр}^I$ ,  $H_{вр}^{II}$ ,  $H_{вр}^{III}$  – нормы времени на техническое обслуживание средств КИПиА I, II и III категорий технической сложности соответственно, чел/ч.

В случае отсутствия в рассматриваемой группе базовой нормы времени  $H_{вр}^6$  производить расчет по следующим формулам:

**Таблица 2.** Способы решения трудностей при расчете КТС

**Table 2.** Solutions in calculating the technical complexity category

Возникшие трудности при расчетах/Difficulties in calculations	Способ решения/Solution
В рассматриваемой группе отсутствуют средства КИПиА, относящиеся к I категории технической сложности In the group there are no control and testing instrumentations related to the first category of technical complexity	$K_{II}$ , $K_{III}$ , $H_{cp}$ не рассчитываются. Необходимо произвести расчет только $H_{cp}^{II}$ и $H_{cp}^{III}$ The $K_{II}$ , $K_{III}$ and $H_{cp}$ coefficients are not calculated. Only $H_{cp}^{II}$ and $H_{cp}^{III}$ should be calculated
В рассматриваемой группе отсутствуют средства КИПиА, относящиеся ко II категории технической сложности In the group there are no control and testing instrumentations related to the second category of technical complexity	Коэффициент $K_{II}$ не рассчитывается The $K_{II}$ coefficient is not calculated
В рассматриваемой группе отсутствуют средства КИПиА, относящиеся к III категории технической сложности In the group there are no control and testing instrumentations related to the third category of technical complexity	Коэффициент $K_{III}$ не рассчитывается The $K_{III}$ coefficient is not calculated
В рассматриваемой группе отсутствуют средства КИПиА, относящиеся ко II и III категорий технической сложности In the group there are no control and testing instrumentations related to the second and third category of technical complexity	Принять значения коэффициентов, согласно ГЭСНп 81-04-02-2001: $K_{II}=1,313$ ж $K_{III}=1,566$ The following coefficients must be accepted in accordance with GESNp 81-04-02-2001: $K_{II}=1,313$ ж $K_{III}=1,566$

$$H_{вр}^{II} = H_{cp}^{II}; \quad (7)$$

$$H_{вр}^{III} = H_{cp}^{III}. \quad (8)$$

1. При невозможности применения формул (4)–(7) или (8) для нового средства КИПиА формулируются соответствующие обоснования. В этом случае будет рассмотрена необходимость определения нормы времени на техническое обслуживание данных средств КИПиА методом проведения фотографии рабочего дня.

2. Для средств КИПиА, имеющих в своем составе расширяемые каналы формирования входных и выходных сигналов, производить расчет норм времени на техническое обслуживание в зависимости от фактического использования данных каналов (например, к такому устройству относится контроллер).

Под каналом формирования входных и выходных сигналов (каналов) следует понимать совокупность технических средств и линий связи, обеспечивающих преобразование, обработку и передачу информации для использования в системе АСУ ТП. При этом учитывается количество каналов:

- информационных (в том числе каналов измерения, контроля, оповещения, адресных, состояния и т. п.);
- управления;
- в составе информационных каналов и каналов управления в свою очередь учитывается количество каналов:
  - а) дискретных – контактные и бесконтактные на переменном и постоянном токе, импульсные от дискретных (сигнализирующих) измерительных преобразователей, предназначенные для контроля состояния различных двухпозиционных устройств, а также для передачи сигналов типа «включить–выключить» и т. п.;
  - б) аналоговых, к которым относятся все остальные – токовые, напряжения, частоты, взаимной индуктивности, естественные или унифицированные сигналы измерительных пре-

образователей (датчиков), которые изменяются непрерывно, кодированные (импульсные или цифровые) сигналы для обмена информацией между различными цифровыми устройствами обработки информации и т. п.

Расчет нормы времени на техническое обслуживание средства КИПиА с расширяемым количеством каналов [17]:

$$H_{вр}^* = H_{вр} + \frac{H_{и}^д \cdot K_{и}^д + H_{и}^а \cdot K_{и}^а + H_{у}^д \cdot K_{у}^д + H_{у}^а \cdot K_{у}^а}{60}, \quad (9)$$

где  $H_{вр}^*$  – норма времени на техническое обслуживание устройства с учетом фактически используемых каналов формирования входных и выходных сигналов, чел/ч;  $H_{вр}$  – базовая норма времени на техническое обслуживание устройства без учета имеющихся каналов формирования входных и выходных сигналов, чел/ч.

Условные обозначения и значения остальных параметров формулы (9) приведены в табл. 3, 4 [17].

**Таблица 3.** Условные обозначения каналов передачи информации и управления

**Table 3.** Symbols of information transmission and control channels

Условное обозначение Symbol	Наименование Name	Ед. изм. Unit of measurement
$K_{и}^а$	Количество фактически используемых информационных аналоговых каналов The number of actually used analogue information channels	шт. piece
$K_{и}^д$	Количество фактически используемых информационных дискретных каналов The number of actually used discrete information channels	
$K_{у}^а$	Количество фактически используемых аналоговых каналов управления The number of actually used analog control channels	
$K_{у}^д$	Количество фактически используемых дискретных каналов управления The number of actually used discrete control channels	

**Таблица 4.** Условные обозначения и значения норм трудозатрат на ТО каналов передачи информации и управления

**Table 4.** Legend and values of labor costs time norms for information transfer and control channels maintenance

Условное обозначение Symbol	Наименование Name	Значение Value	Ед. изм. Unit of measurement
$H_{\text{и}}^{\text{а}}$	Норма времени трудовых затрат на ТО одного информационного аналогового канала The time rate of labor costs for one information analog channel maintenance	1,37	чел/мин man-minute
$H_{\text{д}}^{\text{а}}$	Норма времени трудовых затрат на ТО одного дискретного канала The time rate of labor costs for one discrete information channel maintenance	0,67	
$H_{\text{у}}^{\text{а}}$	Норма времени трудовых затрат на ТО одного аналогового канала управления The time rate of labor costs for one analog control channel maintenance	7,47	
$H_{\text{д}}^{\text{у}}$	Норма времени трудовых затрат на ТО одного дискретного канала управления The time rate of labor costs for one discrete control channel maintenance	1,31	

#### Программное обеспечение автоматизированного формирования норм трудозатрат

Предложенная методика автоматизированного формирования норм трудозатрат реализована в виде соответствующего алгоритмического и программного обеспечения, основанного на трехуровневой архитектуре: сервер базы данных, сервер приложений (web-сервер) и клиент (браузер). Были спроектированы и реализованы следующие интерфейсы для:

- 1) работы с устройствами КИПиА;
- 2) работы с устройствами АСУ ТП;

- 3) работы с устройствами сооружений связи;
- 4) просмотра регламентов технического обслуживания;
- 5) работы с данными. В интерфейс входят следующие подинтерфейсы: а) интерфейс добавления новых устройств в базу данных; б) интерфейс редактирования существующих устройств в базе данных; в) интерфейс удаления устройств из базы данных; г) интерфейс для работы с регламентами ТО: привязка к устройствам, удаление работ у устройства.

Фрагмент интерфейса для работы с устройствами АСУ ТП представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлена eEPC диаграмма (событийная цепочка процессов), описывающая в обобщенном виде последовательность действий пользователя при вводе в эксплуатацию новой модели оборудования. Результатом является добавление норм времени на ТО в соответствующие разделы базы данных (БД) программного обеспечения автоматизированного формирования нормативов трудозатрат.

Для эффективного применения алгоритма расчета базовых норм для новых устройств была разработана подробная классификация средств КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи для предприятий нефтегазовой отрасли, содержащая более 500 групп устройств, распределенных по 16 базовым категориям.

Применение разработанной методики и основанного на ней программного обеспечения автоматизированного формирования нормативов трудозатрат обеспечивает информационную поддержку следующих связанных с планированием мероприятий технического обслуживания задач управления [18–20].

- 1) формирование графиков планово-предупредительного ремонта и проверки исправности средств КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи;
- 2) формирование отчетов по количеству средств КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи, используемых в рамках производственного процесса;

Нормы времени на техническое обслуживание и ремонт оборудования АСУ ТП												
№ п/п	Наименование оборудования	Тип оборудования	Регламент	Нормы времени (чел-час)								
				Техническое обслуживание				Ремонт				
				Профессия, разряд	ТО-1 (1 раз в мес.)	ТО-2 (1 раз в кварт.)	ТО-3 (1 раз в год)	Все ТО за год	Профессия, разряд	Текущий	Капитал	Все рем. за год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Электротехническое оборудование												
1.1. Задвижки, позиционеры												
1	Контактор	ГМ12	<a href="#">Ссылка на регламент</a>	Слесарь КИПиА, 4	0,06	0,15	0,5	1,43	Слесарь КИПиА, 4	1,2	2,8	4,00
2	Сервоклапан	Fisher 357	<a href="#">Ссылка на регламент</a>	Слесарь КИПиА, 6	0,06	0,23	0,57	1,74	Слесарь КИПиА, 7	0	5,68	5,68
3	Электромагнитный клапан	КЭО 50/40/822/136	<a href="#">Ссылка на регламент</a>	Слесарь КИПиА, 4	0,1	0,6	2,6	5,20	Слесарь КИПиА, 4	3,8	14,1	17,90
4	Электромагнитный клапан	КЭО	<a href="#">Ссылка на регламент</a>	Слесарь КИПиА, 4	0,1	0,6	2,6	5,20	Слесарь КИПиА, 4	3,8	14,1	17,90
5	Электромагнитный клапан	КСП-4	<a href="#">Ссылка на регламент</a>	Слесарь КИПиА, 5	0,2	0,63	1,02	4,51	Слесарь КИПиА, 5	8	19,91	27,91
1.2. Кабельные, импульсные и пневматические линии, шкафы, коробки соединительные												
6	Электронный управляющий термостат	Jumo heatTHERM-AT	<a href="#">Ссылка на регламент</a>	Слесарь КИПиА, 6	0,32	0,63	1,3	5,75	Слесарь КИПиА, 7	1,5	4,5	6,00
7	Электронный управляющий термостат	Jumo ATH-Exi-2	<a href="#">Ссылка на регламент</a>	Слесарь КИПиА, 6	0,32	0,63	1,3	5,75	Слесарь КИПиА, 7	1,5	4,5	6,00

Рис. 2. Фрагмент интерфейса для работы с устройствами АСУ ТП

Fig. 2. Fragment of the APCS equipment software interface



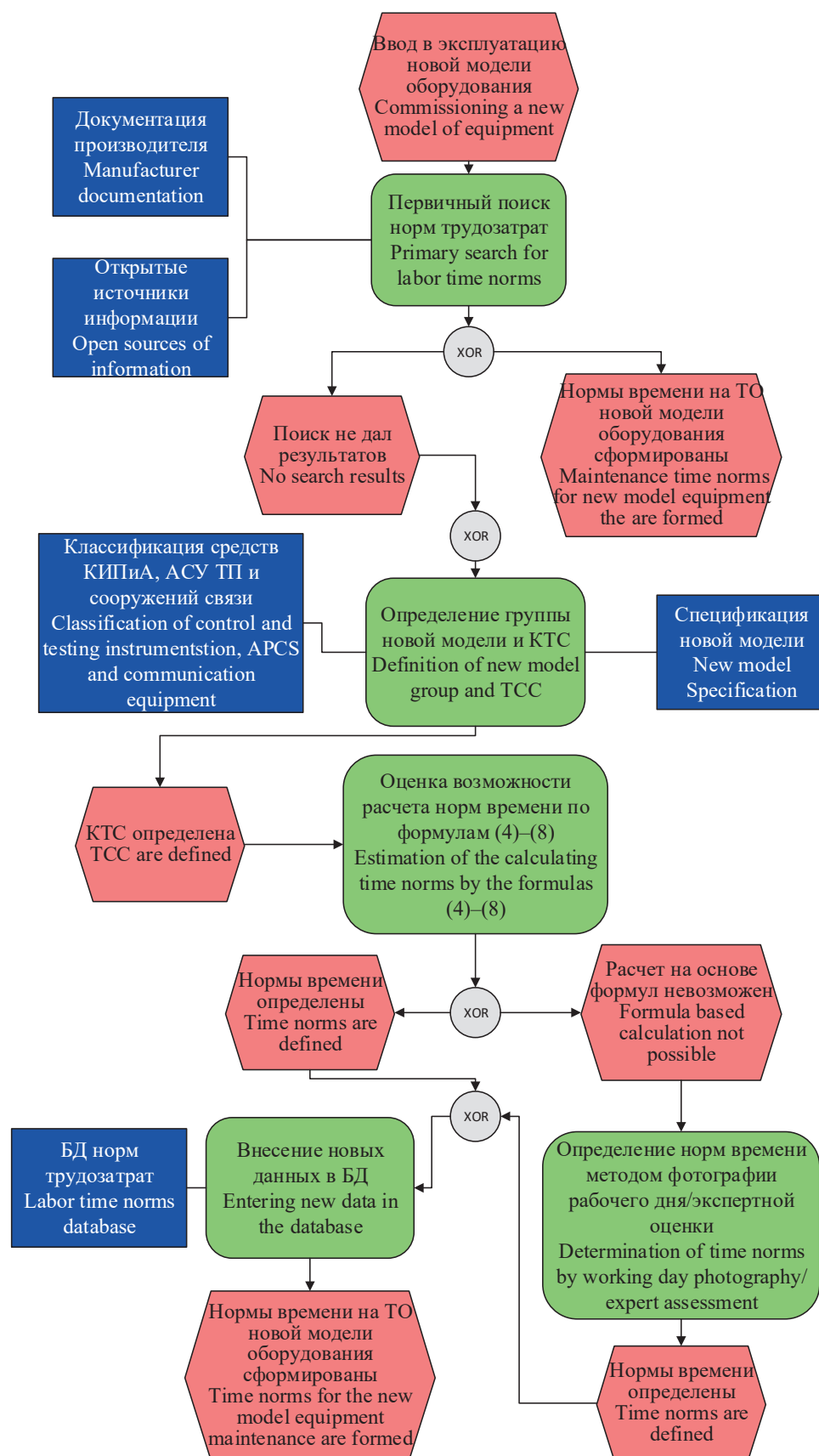


Рис. 3. Событийная цепочка процессов формирования норм времени на ТО новой модели оборудования

Fig. 3. eEPC-diagram of maintenance time norms generation for a new equipment model

- 3) расчет времени (человеко-часов) на проведение ТО имеющихся объемов средств КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи.

По вопросам, связанным с приобретением и адаптацией разработанного решения, можно обратиться в отделение информационных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, или по e-mail авторов статьи.

#### Заключение

В ходе проведенного исследования была разработана методика автоматизированного формирования базовых норм трудозатрат на проведение операций технического обслуживания средств КИПиА, АСУ ТП и сооружений связи для предприятий нефтегазовой отрасли. Методика обеспечивает единый регламент порядков расчета норм трудозатрат и возможность формирования норм для новых единиц оборудования, а также обладает возможностью адаптации для применения в рамках промышленных предприятий других отраслей народного хозяйства.

Применение разработанной методики, помимо упорядочивания процесса нормирования трудозатрат, обеспечивает повышение эффективности процессов планирования мероприятий технического обслуживания, что в свою очередь позволяет сформировать более точную оценку стоимости жизненного цикла продукции.

Методика была апробирована при выполнении научно-исследовательской работы по теме «Разработка и исследование прототипа системы расчета и хранения нормативов трудозатрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования и сооружений связи ОАО «Томскнефть» ВНК» и позволила в автоматизированном режиме сформировать базовые нормы трудозатрат на техническое обслуживание для более чем 4000 моделей оборудования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации государственного задания в сфере научной деятельности, выполнения проектов для получения первичных научных результатов, обеспечивающих расширение участия подведомственных образовательных организаций в реализации Национальной технологической инициативы, № 8.10283.2018/11.12.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maintenance decision support for manufacturing systems based on the minimization of the life cycle cost / A. Reina, A. Kocsis, A. Merlo, I. Nemeth, F. Aggogeri // 49<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems. – Germany, 2016. – P. 674–679.
2. Silivant D. Reliability centered maintenance cost modeling: Lost opportunity cost // Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). – Palm Harbor, USA, 2015. – article № 7105111.
3. Verma N.K., Subramanian T.S.S. Cost benefit analysis of intelligent condition based maintenance of rotating machinery // 7<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – Singapore, 2012. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6360940> (дата обращения 09.10.2018).
4. Chan T., de Vericourt F., Besbes O. Contracting in Medical Equipment Maintenance Services: an Empirical Investigation. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2494265](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2494265) (дата обращения 09.10.2018).
5. Mushiri T., Hungwe R., Mbohwa C. An artificial intelligence based model for implementation in the petroleum storage industry to optimize maintenance // IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). – Singapore, 2017. – P. 1485–1489.
6. Sensors: The Enablers for Proactive Maintenance in the Real World / M. Albano, L.L. Ferreira, G. Di Orio, P. Malo et al. // 5<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). – Thessaloniki, Greece, 2018. – P. 569–574.
7. Cheng Z., Rong L., Liu Z. A RCM analytical method considering proactive maintenance // International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). – Chengdu, China, 2013. – P. 1473–1476.
8. Liao W., Wang T. An optimization approach using in production scheduling with different order // 7<sup>th</sup> International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). – Oxford, UK, 2018. – P. 237–241.
9. Impact of intelligent wireless sensor network on predictive maintenance cost / S. Sadiki, M. Faccio, M. Ramadany, D. Amgouz, S. Boutahar // 4<sup>th</sup> International Conference on Optimization and Applications (ICOA). – Mohammedia, Morocco, 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8370573> (дата обращения 09.10.2018).
10. Maintenance scheduling in the electricity industry: a literature review / A. Froger, M. Gendreau, J. Mendoza, E. Pinson, L.M. Rousseau // European Journal of Operational Research. – 2016. – V. 251. – № 3. – P. 695–706.
11. Типовые нормы времени на монтаж контрольно-измерительных приборов и средств автоматики в нефтяной промышленности (утв. Приказом Миннефтепрома СССР от 29.09.1987 N 692). URL: [http://www.libussr.ru/doc\\_ussr/usr\\_14308.htm](http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_14308.htm) (дата обращения 09.10.2018).
12. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 14 октября 2011 г. N 1175н «Об утверждении Межотраслевых типовых норм времени на работы по сервисному обслуживанию оборудования телемеханики, сопровождению и доработке программного обеспечения». URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/55172593/paragraph/1:0> (дата обращения 09.10.2018).
13. Укрупненные нормы времени на техническое обслуживание, ремонт и метрологическое обеспечение контрольно-измерительных приборов и автоматики. URL: <https://docplayer.ru/31837689-Ukrupnennyye-normy-vremeni-na-tehnicheskoe-obsluzhivanie-remont-i-metrologicheskoe-obespechenie-kontrolno-izmeritelnyh-priborov-i-avtomatiki.html> (дата обращения 09.10.2018).
14. Единые нормы времени на монтаж и демонтаж нефтепромыслового оборудования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200082881> (дата обращения 09.10.2018).
15. Доработанный текст проекта Приказа Министерства энергетики РФ «Об утверждении Правил организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей» (подготовлен Минэнерго России 08.08.2017). URL: <http://base.garant.ru/56725433/> (дата обращения 09.10.2018).
16. Правила эксплуатации и безопасности обслуживания средств автоматизации, телемеханизации и вычислительной техники в газовой промышленности. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003260> (дата обращения 09.10.2018).

17. ГЭСНп 81–04–02–2001 «Государственные элементные сметные нормы на пусконаладочные работы. Сборник 2. Автоматизированные системы управления (издание 2008 г. с учетом изменений и дополнений)». URL: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/55/55022/index.htm> (дата обращения 09.10.2018).
18. Кошкин А.И., Попов Е.А. Разработка информационной системы учета технического обслуживания систем КИПиА, АСУТП и метрологии // Информационные технологии в управлении и экономике. – 2017. – Т 2. – Вып. 7. – С. 45–57.
19. Mainkar M.S., Rathod R.K. Maintenance Management System Effective Tool to Progress and Reach Total Productive Maintenance & Six Sigma Business Development Strategies // International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Application (ICIMSA). – Seoul, South Korea, 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7985593> (дата обращения 09.10.2018).
20. Rastegari A., Mobin M. Maintenance decision making, supported by computerized maintenance management system // Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). – Tucson, USA, 2016. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7448086> 7985593 (дата обращения 09.10.2018).

*Поступила 10.10.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Савельев А.О.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Комагоров В.П.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Михалевич С.С.**, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-образовательной лаборатории промышленной робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 65.011.56

## APPROACH TO AUTOMATED FORMATION TIME NORMS FOR MAINTENANCE OF CONTROL AND TESTING INSTRUMENTATION, APCS AND COMMUNICATION EQUIPMENT OF OIL AND GAS ENTERPRISES

**Aleksey O. Savelev<sup>1</sup>,**

sava@tpu.ru

**Vladimir P. Komagorov<sup>1</sup>,**

komagorov@tpu.ru

**Sergey S. Mikhalevich<sup>1</sup>,**

mihalevichss@tpu.ru

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

**The relevance** of the research is caused by the need to update and revise constantly the strategy of oil and gas enterprises economic efficiency by optimizing the costs of control and testing instrumentation, APCS and communication equipment maintenance.

**The main aim** of the research is to develop a scientifically based approach to the automated maintenance time standard of control and testing instrumentation, APCS and communication equipment. The approach should allow reducing the time and increasing the overall efficiency of the maintenance planning process.

**Objects** of the research are technological installations of oil and gas production, preparation, pumping and storage, reservoir pressure maintenance; transport pipeline, equipment for automated process control systems; communication facilities: radio-relay and satellite communication systems, wired communication systems, fiber-optic communication lines, telephone exchanges, trunk communication systems, video surveillance and alarm systems.

**Methods.** To automate the formation of labor standards for maintenance of new equipment, the method of classifying equipment in-to categories of technical complexity was used.

**Results.** The authors have developed the automated calculation method for maintenance of labor cost standards. The method is based on the categories of technical complexity. The requirements for formation of software basic labor norms were determined. On the basis of the proposed methodology, basic labor standards for control and testing instrumentation, APCS and communication equipment maintenance were formed (within Tomskneft company).

### **Key words:**

Maintenance management system, life cycle cost, maintenance strategies, production automation, labor costing.

*The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the RF within the implementation of the State Task in the field of scientific activities, projects for obtaining primary scientific results ensuring the extend of participation of subordinate educational establishments in implementation of the National Technological Initiative, no. 8.10283.2018/11.12.*

### **REFERENCES**

1. Reina A., Kocsis A., Merlo A., Nemeth I., Aggogeri F. Maintenance decision support for manufacturing systems based on the minimization of the life cycle cost. *49<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems*. Germany, 2016. pp. 674–679.
2. Silivant D. Reliability centered maintenance cost modeling: Lost opportunity cost. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. Palm Harbor, USA, 2015. Article № 7105111.
3. Verma N.K., Subramanian T.S.S. Cost benefit analysis of intelligent condition based maintenance of rotating machinery. *7<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Singapore, 2012. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6360940> (accessed 09 October 2018).
4. Chan T., De Vericourt F., Besbes O. *Contracting in Medical Equipment Maintenance Services: an Empirical Investigation*. Available at: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2494265](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2494265) (accessed 09 October 2018).
5. Mushiri T., Hungwe R., Mbohwa C. An artificial intelligence based model for implementation in the petroleum storage industry to optimize maintenance. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. Singapore, 2017. pp. 1485–1489.
6. Albano M., Ferreira L.L., Di Orio G., Malo. P. etc. Sensors: The Enablers for Proactive Maintenance in the Real World. *5<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. Thessaloniki, Greece, 2018. pp. 569–574.
7. Cheng Z., Rong L., Liu Z. A RCM analytical method considering proactive maintenance. *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*. Chengdu, China, 2013. pp.1473–1476.
8. Liao W., Wang T. An optimization approach using in production scheduling with different order. *7<sup>th</sup> International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*. Oxford, UK, 2018. pp. 237–241.
9. Sadiki S., Faccio M., Ramadany M., Amgouz D., Boutahar S. Impact of intelligent wireless sensor network on predictive maintenance cost. *4<sup>th</sup> International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*. Mohammedia, Morocco, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8370573> (accessed 09 October 2018).
10. Froger A., Gendreau M., Mendoza J., Pinson E., Rousseau L.M. Maintenance scheduling in the electricity industry: a literature review. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 251, no. 3, pp. 695–706.



11. *Tipovye normy vremeni na montazh kontrolno-izmeritelnykh priborov i sredstv avtomatiki v neftyanoy promyshlennosti* [Typical standard time for installation of instrumentation and automation in the oil industry]. Available at: [http://www.libussr.ru/doc\\_ussr/ussr\\_14308.htm](http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_14308.htm) (accessed 09 October 2018).
12. *Prikaz Ministerstva zdavookhraneniya i sotsialnogo razvitiya RF ot 14 oktyabrya 2011 g. N 1175n* [Order of the Ministry of Health and Social Development of the Russian Federation of October 14, 2011 N 1175n]. Available at: <http://ivo.garant.ru/#/document/55172593/paragraph/1:0> (accessed 09 October 2018).
13. *Ukrupnennye normy vremeni na tekhnicheskoe obsluzhivanie, remont i metrologicheskoe obespechenie kontrolno-izmeritelnykh priborov i avtomatiki* [Extended time standards for maintenance, repair and metrological support of instrumentation and automation]. Available at: <https://docplayer.ru/31837689-Ukrupnennye-normy-vremeni-na-tehnicheskoe-obslyuzhivanie-remont-i-metrologicheskoe-obespechenie-kontrolno-izmeritelnykh-priborov-i-avtomatiki.html> (accessed 09 October 2018).
14. *Edinye normy vremeni na montazh i demontazh neftepromyslovogo oborudovaniya* [Uniform time standards for installation and dismantling of oilfield equipment]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200082881> (accessed 09 October 2018).
15. *Dorabotanny tekst proekta Prikaza Ministerstva energetiki RF «Ob utverzhdenii Pravil organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya, zdaniy i sooruzheniy elektrostaniy i setey»* [The revised text of the draft Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation «On Approval of the Rules for Organizing Maintenance and Repair of Equipment, Buildings and Structures of Power Plants and Networks»]. Available at: <http://base.garant.ru/56725433/> (accessed 09 October 2018).
16. *Pravila ekspluatatsii i bezopasnosti obsluzhivaniya sredstv avtomatizatsii, telemekhanizatsii i vychislitelnoy tekhniki v gazovoy promyshlennosti* [Rules of operation and safety of automation equipment, telemechanization and computing equipment maintenance in the gas industry]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200003260> (accessed 09 October 2018).
17. *GEHSNp 81–04–02–2001 «Gosudarstvennye elementnye smetnye normy na puskonalochnye raboty. Sbornik 2. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya (izdanie 2008 g. s uchetom izmeneniy i dopolneniy)»* [GESNp 81–04–02–2001 «State elemental estimated norms for commissioning and commissioning. Collection 2. Automated control systems (2008 edition with changes and additions)»]. Available at: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/55/55022/index.htm> (accessed 09 October 2018).
18. Koshkin A.I., Popov E.A. Development of an information system for accounting of instrumentation and automation systems, process control systems and metrology maintenance. *Information technology in management and economics*, 2017, vol. 2, Iss. 7, pp. 45–57. In Rus.
19. Mainkar M.S., Rathod R.K. Maintenance Management System Effective Tool to Progress and Reach Total Productive Maintenance & Six Sigma Business Development Strategies. *International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Application (ICIMSA)*. Seoul, South Korea, 2017. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7985593> (accessed 09 October 2018).
20. Rastegari A., Mobin M. Maintenance decision making, supported by computerized maintenance management system. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. Tucson, USA, 2016. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7448086> 7985593 (accessed 09 October 2018).

Received: 10 October 2018.

#### Information about the authors

**Aleksey O. Savelev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vladimir P. Komagorov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey S. Mikhalevich**, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 577.1

## ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КАК ИНДИКАТОР ТЕХНОГЕНЕЗА

Рихванов Леонид Петрович<sup>1</sup>,  
rikhvanov@tpu.ru

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

Корогод Наталья Петровна<sup>2</sup>,  
natalya\_korogod@mail.ru

Хвощевская Альбина Александровна<sup>1</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru

Копылова Юлия Григорьевна<sup>1</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru

Мазурова Ирина Сергеевна<sup>1</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru

Муканова Роза Жумкеновна<sup>2</sup>,  
rozam14@mail.ru

Туркбенов Тимур Каиргалиевич<sup>2</sup>,  
turbanovtk@yandex.ru

Скрипник Мария Ивановна<sup>1</sup>,  
mtmmashulia@mail.ru

Беляновская Александра Игоревна<sup>1</sup>,  
aib28@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Павлодарский государственный педагогический университет,  
Казахстан, 140000, г. Павлодар, ул. Мира, 60.

Техногенез – глобальный процесс, оказывающий влияние на все геосферные оболочки Земли. Индикация воздействия промышленных объектов проводится с применением комплекса методов, включая биогеохимические исследования и мониторинг. Для их организации требуется постоянное развитие и совершенствование как технических средств анализа, так и методических подходов, учеными всего мирового сообщества прикладываются усилия для поиска новых индикаторных объектов, наиболее адекватно отражающих техногенные последствия для окружающей среды и здоровья населения. В качестве такого индикатора можно применять воду. Вода обладает огромными экологическими функциями вообще и особыми функциями для живого организма, но, не смотря на значительную роль и длительную историю исследований, ее химический состав изучен слабо. На долю воды, относящейся по определению В.И. Вернадского к «воде биологической», приходится 0,0003 % ресурсов Земли. Однако именно изменение ее элементного состава является наиболее объективным показателем техногенной трансформации, происходящей под влиянием разнопрофильных промышленных объектов. Работы, показывающие фоновый химический состав этого ресурса, являются основой для организации мониторингового исследования на территориях интенсивного техногенного прессинга.

**Актуальность** исследования определяется отсутствием детальной изученности широкого круга химических элементов в составе отдельных органов и тканей живых организмов, в том числе воды, находящейся в них. Эта субстанция отражает химический состав среды обитания организма и может быть объектом мониторинга. Химическая близость организма свиньи домашней к человеку позволяет в дальнейшем получить новый инструмент по оценке качества мест проживания человека, при котором оценивается непосредственно организм в целом, что существенно повысит объективность исследований.

**Цель** работы заключается в исследовании химического состава воды биологической отдельных органов и тканей на примере свиньи домашней для получения фоновых характеристик для биогеохимического мониторинга.

**Методы.** Органы и ткани семимесячного поросенка были отобраны в пос. Успенка Павлодарской области (Казахстан) непосредственно во время забоя, после чего упаковывались в пластиковые пакеты. Вода биологическая выделялась способом вакуумной возгонки при нагревании. Извлеченная аликвота анализировалась в аккредитованном научно-образовательном центре «Вода» Национального исследовательского Томского политехнического университета методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой по аттестованной методике НСАМ 480Х на спектрометре NexION 300D.

**Результат.** Изучен состав и особенности распределения 70 химических элементов в воде биологической, выделенной методом вакуумной возгонки из органов и тканей свиньи домашней, отобранных на территории условно экологически благоприятного пос. Успенка Павлодарской области. Выявлена взаимосвязь между элементным составом биожидкости и физиологическими функциями органов исследуемых животных, а также составом среды обитания.

### Ключевые слова:

Техногенез, биогеохимия, вода биологическая, химические элементы, метод вакуумной возгонки, ICP-MS, геохимический индикатор, фоновый мониторинг.

### Введение

Процессы, связанные с деятельностью человека, уже значительно изменили и продолжают изменять геохимическую обстановку Земли. В результате техногенеза, развивающегося на территориях размещения промышленных объектов, а также в районах добычи, переработки полезных ископаемых, хранения и утилизации отходов, происхо-

дят процессы, значительно изменяющие химизм среды.

Для того, чтобы иметь объективную картину преобразований в геохимических циклах элементов, необходимы знания об их фоновых концентрациях. При организации мониторинговых исследований в районах действия техногенеза используют ряд методов и подходов, в том числе биогеохимиче-

ские исследования, включающие изучение элементного состава живых организмов и циклическую миграцию элементов с их участием. При этом зачастую используется либо озолненное, либо сухое вещество. В то же время следует отметить, что все живое состоит из воды, которая сама по себе является глобальным ресурсом планеты и прекрасным мониторинговым объектом.

Вода – это жизнь, а жизнь – это вода. Общеизвестный постулат о том, что живой организм любого уровня организации не существует без простейшего химического соединения  $H_2O$  – оксида водорода или просто воды. Это соединение обладает удивительными физическими и химическими свойствами в зависимости от условий своего нахождения в природе [1, 2]. Вода обладает огромными экологическими функциями вообще и особыми физиологическими функциями для живого организма [3], отражая в своем составе изменения внешней среды и состояния организма. Доказано, что в своем химическом составе кровь млекопитающих, как соединительная ткань, на 80 % состоящая из воды, влияет на микроэлементный состав органов вне зависимости от пола и возраста животного [4] и отражает степень проявленности техногенеза на территории проживания живых организмов [5]. Такие биологические жидкости, как плазма крови, спинномозговая жидкость, содержащие в своём составе большое количество воды, используются в качестве биомаркера при диагностировании ряда заболеваний, таких как инсульт, болезнь Шарко и др. [6–8].

На долю воды, находящейся в живых организмах, приходится 0,0003 % от объема гидросферы. Ее очень часто в литературе называют биологической водой (жидкостью), и ее содержание в живых организмах колеблется в весьма широком диапазоне: от 3 и менее % массы в костях до 92 % от живой массы в крови [9]. Общее количество воды в организме взрослого человека составляет 30–50 л, то есть около 60 % его массы при весе в 60–70 кг [3]. История изучения этого вопроса весьма впечатляющая. Роберт Питтс со ссылкой на работу Говарда Склтена [10], датируемую 1927 г., приводил данные о распределении воды в организме человека, весом 70 кг: жировая ткань – 10 %, скелет – 22 %, печень – 68,3 %, мышцы – 75,6 %, мозг – 74,8 %, кровь – 83,0 % [11]. Известно, что в трудах французских ученых вопрос о воде в организме растений и животных обсуждался уже в 1885 г. [12]. Количество воды в организме колеблется в зависимости от пола, возраста, физиологических показателей [13]. Следует отметить, что, не смотря на огромную физиологическую роль воды в организме человека и длительную историю исследований, ее химический состав изучен слабо, за исключением отдельных элементов, активно участвующих в электролитном обмене, – таких как натрий, кальций, хлор, калий и некоторые другие [14]. В специальной медицинской и биологической литературе можно встретить данные по этим и некоторым другим ионам, но их набор крайне ограни-

чен, даже для макроэлементов, не говоря уже о микро- и ультрамикроэлементах, физиологическая роль которых в живом организме, в том числе в организме человека, чрезвычайно велика [15, 16].

Такая же ситуация наблюдается для других живых организмов. В некоторых случаях изучен водный баланс отдельных представителей сельскохозяйственных животных, таких как куры, овцы, свиньи [17].

Известно, что общее содержание воды в теле животных колеблется от 50 до 80 % живой массы и изменяется с возрастом. У свиньи домашней, например, при рождении он равен 80 %, а в возрасте 90 дней – уже 46 %. Органы и ткани животных по содержанию в них воды делят на три группы: бедные водой (жировая, костная ткани), умеренно богатые (мышцы, печень, кровь) и очень богатые (серое вещество мозга, лимфа, эластичная ткань и др.). При этом, анализируя содержание химических элементов в жидкости, выделенной из отдельных органов и тканей, авторы, как правило, ограничиваются лишь некоторыми биологически значимыми химическими элементами, исключив из поля зрения огромное количество микроэлементов, роль которых может оказаться столь же значимой в физиологических процессах, каковой она оказалась, например, у кобальта.

Следует отметить, что химический состав вод гидросферы (морской, поверхностной, подземной, атмосферной, ледниковой и т. д.) достаточно хорошо изучен и она является объектом специального изучения, но вода биологическая находится вне рассмотрения как физиологов, за исключением ряда катионов и анионов (K, Na, Ca, Mg, Cl и ряда других), так и геохимиков, не желающих вторгаться в область биологической материи.

Междисциплинарность на стыке биологии и геохимии данного научного исследования, получившая, с лёгкой руки В.И. Вернадского, название биогеохимия или геохимия живого вещества, является её спецификой.

Практически полное отсутствие детальной информации по широкому кругу химических элементов в составе биологической воды (жидкости) отдельных органов и тканей, в целом живых организмов, в том числе растений, возможность использования новых индикаторных показателей для оценки качества среды их обитания, степени её трансформации и определяет актуальность данной статьи.

#### Материалы и методы

Авторы, приступая к изучению воды живых организмов, отдавали себе отчёт в том, что следовало решить два основных вопроса: вопрос о выборе модельного организма для исследования и способ отбора жидкости.

Для анализа количественного и качественного состава воды живого вещества как модельный вид был выбран организм свиньи домашней (*Sus Scrofa domestica* L.). Особенности формирования хими-

ческого состава тканей свиньи домашней (*S.S. domestica* L.) активно изучаются иностранными авторами [18–20]. Ранее проведенные нами исследования по содержанию химических элементов в сухом остатке органов и тканей данного вида показали практически полное их совпадение с данными по содержанию химических элементов в органах и тканях человека – жителя аналогичных территорий [21]. Организм этого животного, по мнению физиологов, является близким к человеческому.

Объектом для отбора жидкости из органов и тканей стал семимесячный поросенок, органы и ткани которого были отобраны сразу после забоя в пос. Успенском Павлодарской области Республики Казахстан. Данный поселок выбран как условно чистый район Павлодарской области, что подтверждается результатами эколого-геохимического мониторинга, проведенного нами ранее с использованием разных природных сред, таких как листья тополя, накипь питьевых вод и других.

Органы отбирались полностью, упаковывались в пластиковые пакеты и доставлялись в лабораторию в течение часа, где производилось их взвешивание. Мышцы и подкожный жир были отобраны с правого бедра в произвольном объеме, кровь отбиралась в стерильную пробирку из сонной артерии.

Для отбора жидкости из органов был использован способ вакуумной возгонки при нагревании. Данный метод предполагает частичное испарение жидкой смеси путем непрерывного отвода и конденсации образовавшихся паров. Для этого была собрана установка, показанная на рис. 1.

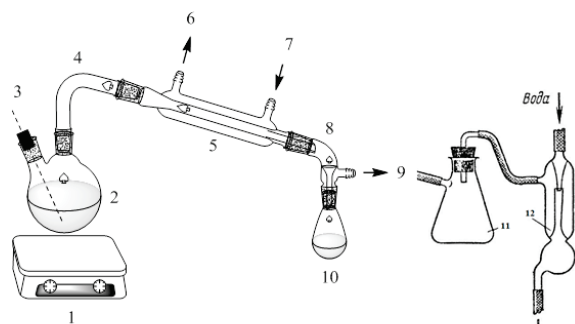


Рис. 1. Установка для возгонки воды из живой ткани: 1 – нагревательное устройство; 2 – колба круглодонная на 250 мл; 3 – капилляр стеклянный (для подачи воздуха); 4 – переходник; 5 – прямой холодильник; 6 – сброс холодной воды; 7 – подача холодной воды; 8 – аллонж с отводом; 9 – соединение с водоструйным насосом; 10 – приемник; 11 – промежуточная склянка Вульфа; 12 – водоструйный насос

Fig. 1. Installation for water sublimation from a living tissue: 1 is the heating device; 2 is the 250 ml round bottomed flask; 3 is the glass capillary; 4 is the reducing bush; 5 is the Liebig condenser; 6 is the cold water reset; 7 is the cold water supply; 8 is the side-arm adapter; 9 is the connector to the water-suction pump; 10 is the receiver; 11 is the Wolf's bottle; 12 is the water-suction pump

Перед каждым использованием все стеклянное оборудование тщательно промывалось, ополаски-

валось дистиллированной водой и сушилось при 250 °С в течение 4 часов в муфельной печи.

Температура перегонки составляла 100 °С, вакуум в системе находился на уровне 50–100 мм. рт. ст.

На всем этапе перегонки проводился временной контроль за началом и окончанием выделения жидкой фазы. По окончании эксперимента определялась масса дистиллята кубового остатка.

В выделенной жидкости в аккредитованном научно-образовательном центре «Вода» Национального исследовательского Томского политехнического университета (руководитель центра Ю.Г. Копылова) методом индуктивно-связанной плазмы по аттестованной методике НСАМ 480Х на спектрометре NexION 300D выполнено определение максимально возможного количества химических элементов – 70. Установлено, что из них 17 содержится ниже предела обнаружения данным методом: Sc (0,00001), Ru (0,000005), Rh (0,000001), Pd (0,000005), In (0,000001), Te (0,000001), Eu (0,0000005), Er, Tm, Yb, Lu (0,0000005), Hf (0,0000005), Os (0,0000005), Ir (0,000005), Pt (0,000005), Hg (0,00005), Re (0,000001).

Кроме того, в пробах было определено три аниона, оцененных приближенно количественным химическим методом ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$ ). Методом индикаторной бумаги в аликвоте измерен показатель pH.

#### Полученные результаты и их обсуждение

Анализ полученных данных по количеству выделенной жидкости показывает, что время начала ее отдачи и продолжительность выделения, а также объем выделения различен для каждого вида материала (таблица).

По продолжительности времени выделения дистиллята выстраивается следующий ряд: лёгкие–мышцы–подкожный жир–почка–селезёнка–кровь–печень.

По количеству выделившейся жидкости от массы исследованного материала (%) эта последовательность имеет следующий вид: печень и подкожный жир (5,5)–лёгкие (6,2)–кровь (7,2)–мышцы (8,9)–почки (17)–селезёнка (25).

Установлено, что щелочным показателем (pH-8) характеризуются выделенные жидкости из почки, крови и подкожного жира. Тогда как все остальные имеют нейтральный (pH-7) показатель. Следует отметить, что водородный показатель характеризуется весьма узкими диапазонами колебаний внутренней среды и строго контролируется буферными системами организма.

В соответствии с многочисленными литературными данными [22] в норме слабокислая среда наблюдается в подкожном жире (pH – 5,8), в печени (pH – 6,4) и в выделительной системе (pH – 6). Слабощелочная среда отмечается в крови (pH – 7,35–7,47).

Анализ кривой распределения 43 изученных химических элементов, встречающихся во всех изученных органах и тканях животного в значимых количествах (рис. 2), показывает, что общий



**Таблица.** Динамика выделения и объём выделившейся жидкости из органов и тканей свиньи домашней (*Sus Scrofa domestica L.*) методом возгонки

**Table.** Dynamic of excretion and volume of excreted biological water from the domestic pig (*S. S. domestica L.*) organs and tissues by sublimation

Орган, ткань Organs, tissues	Вес исходного материала, г Weight of source material, g	Время начала перегонки Distillation start time	Время появления конденсата Time of condensate occurrence	Время появления первой капли Time of the first drop appearance	Время окончания перегонки Ending distillation time	Продолжительность выделения Duration of extraction	Масса дистиллята, г Distillate weight, g	Остаток материала после возгонки, г Residue of the material after sublimation, g	% выделения дистиллята от исходной массы % of distillate separation from the initial mass
Кровь/Blood	92	12,56	13,19	14,02	16,20	2 ч. 18'	6,6	–	7,2
Селезенка/Spleen	38	12,25	12,35	13,00	14,55	1ч. 55'	9,5	25	25
Печень/Liver	182	11,09	11,50	12,20	15,53	3 ч. 33'	10	146	5,5
Почка/Kidney	88	11,34	11,47	12,05	13,52	1 ч. 47'	15	64	9170
Легкое/Lung	97	15,27	15,43	16,12	17,13	1 ч. 01'	6	75	6,2
Мышечная/Muscle	135	11,39	12,03	12,17	13,35	1 ч. 18'	12	114	8,9
Подкожный жир/Subcutis	100	14,35	14,48	15,06	16,45	1 ч. 39'	5,5	86	5,5

ее характер соответствует двум основным геохимическим закономерностям распределения элементов в материальных объектах Мира:

- 1) закону Кларка–Менделеева–Вернадского о преобладании легких элементов над тяжелыми;
- 2) закону Оддо–Гаркина о распределении четных и нечетных элементов.

В количествах больше 1 мг/л или приближающихся к этому в жидкостях почти всех органов и тканей отмечается Na, Ca, Mg, Si, K, что, видимо, связано с физиологическими функциями данных элементов.

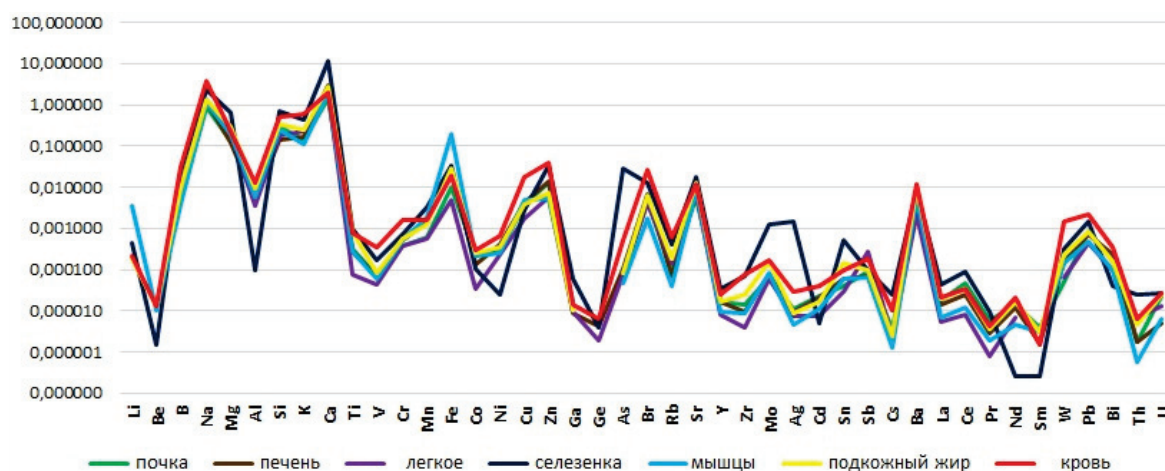
Последовательный ряд органов и тканей по частоте встречаемости максимальных концентраций элементов может быть представлен в следующем виде: кровь (25 из 56)?селезенка (19)?почки, подкожный жир (4)?мышцы (3)?легкие (2)?печень (1). Как видно, 25 элементов из 56 обнаруженных в максимальных концентрациях фиксируется в воде, выделенной из крови. Следует отметить, что кровь является самой динамичной из всех тканей в живом организме, выполняя транспортную функцию и перенося минеральные вещества из органов и тканей, осуществляя обменные процессы. Поэтому макси-

мум концентрации химических элементов в водной фазе данной ткани представляется логичным.

Девятнадцать из изученных элементов концентрируются в максимальных значениях в жидкости, полученной из селезенки. Одной из функций этого органа является поддержание водного баланса организма [23]. Селезенка, являясь центральным органом лимфосистемы, за сутки в среднем способна из тканевой жидкости образовать около 2 л лимфы при скорости движения около 300 мл/сек. Этот орган, кроме того, ответственен за очищение тканей от продуктов распада и токсинов. Поэтому не удивительно, что именно в нем, наравне с кровью, наблюдается максимальное концентрирование изученных химических элементов в мобильной растворенной форме.

Другие биологические жидкости по количеству максимально накапливающихся элементов выглядят следующим образом:

- Легкие – 2 (Sb, Ta);
- Почки – 4 (Al, Sm, Gd, I);
- Печень – 1 (Dy);
- Мышцы – 3 (Li, W, Fe);
- Подкожный жир – 4 (Be, Ba, Gd, Au).



**Рис. 2.** Распространённость изученных химических элементов (мг/л) в воде биологической, выделенной из органов и тканей свиньи домашней (*S. S. Domestica L.*)

**Fig. 2.** Content of studied chemical elements (mg/l) in biological water, extracted from the domestic pig (*S.S. Domestica L.*) organs and tissues

Удивительным оказался факт незначительного концентрирования элементов в воде, выделенной из печени, хорошо снабжающейся кровью и являющейся органом-депо. По-видимому, именно депонирующая роль приводит к концентрированию элементов не в растворенной форме, а в твердом остатке, что требует дальнейшего изучения.

Концентрация U в изученных органах и тканях практически всегда выше Th, и только в воде, выделенной из селезенки, их содержания почти близки и отношение Th/U приближается почти к 1 (рис. 3). Следует отметить, что по этому показателю она является аномальной и приближается к ториевому типу вод, впервые выявленному нами для вод гидросферы [24].

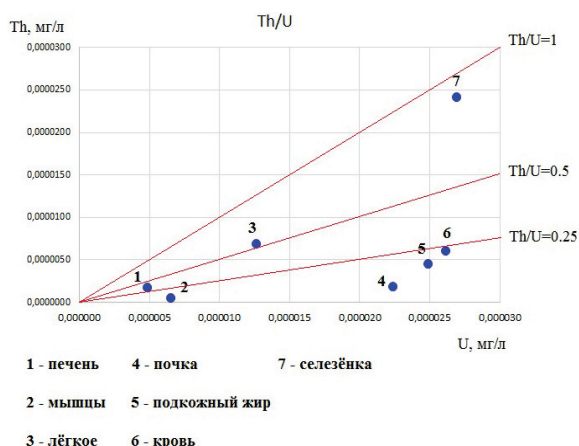


Рис. 3. Распределение органов и тканей свиньи домашней (*S.S. Domestica L.*) по содержанию Th и U в биологических жидкостях

Fig. 3. Allocation of organs and tissues of Domestic pig (*S.S. Domestica L.*) in content of Th, U in biological water of domestic pig (*S.S. Domestica L.*)

Обращает на себя внимание, что жидкость из селезенки содержит максимальные количества как естественных радиоактивных элементов, так и редких земель (рис. 3, 4), что может указывать на их общие механизмы миграции и концентрирования.

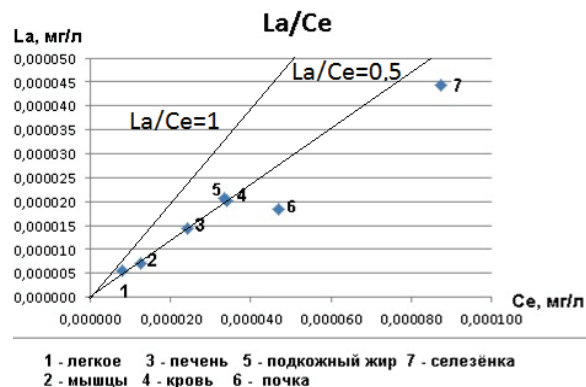


Рис. 4. Распределение органов и тканей по содержанию La и Ce в биологических жидкостях свиньи домашней (*S.S. Domestica L.*)

Fig. 4. Allocation of organs and tissues in content of La, Ce in biological water of domestic pig (*S.S. Domestica L.*)

Отмечается, что в исследованной воде Ce больше La, а Ce/La отношение (рис. 3) близко к таковому для речных и океанических вод.

Нормирование, выполненное относительно воды озера Байкал – условного эталона ультрапресной чистой воды [24], показывает, что содержание значительной части элементов в изученных биологических жидкостях выше. Исключение составляют Li, Mg, K, Ca, V, Ge, As, Rb, Sr, Mo, Ba, U, содержание которых много ниже во всех органах и тканях, по сравнению с водой озера Байкал, а также Ni, Cd, Nd в воде, выделенной из селезенки (рис. 5).

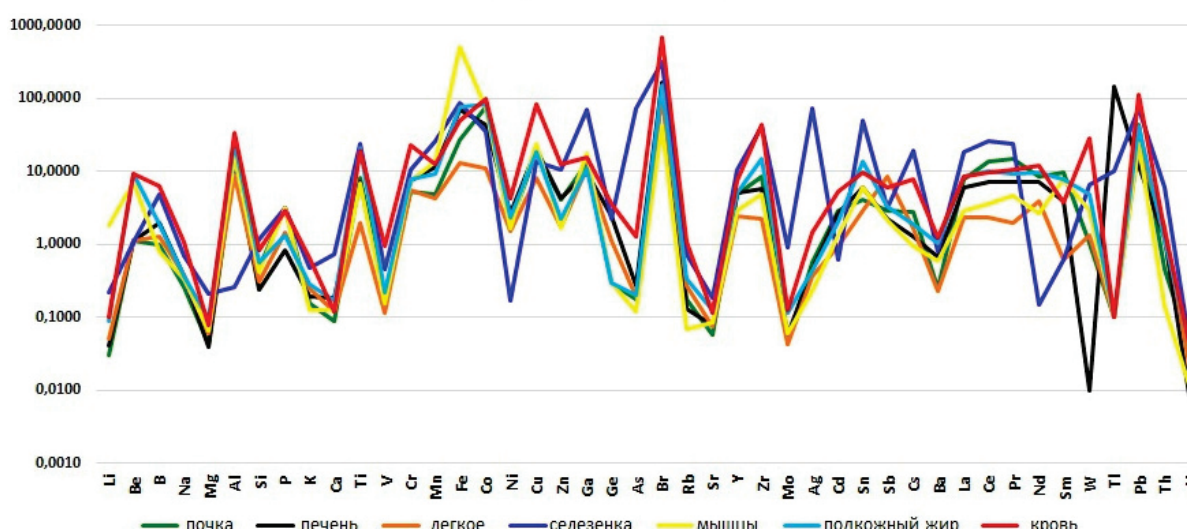


Рис. 5. Нормированная, относительно байкальской воды, кривая распределения изученных химических элементов в воде органов и тканей свиньи домашней (*S.S. Domestica L.*)

Fig. 5. Chemical elements centile curve in biological water of domestic pig (*S.S. Domestica L.*) rated with respect of Baikal lake water

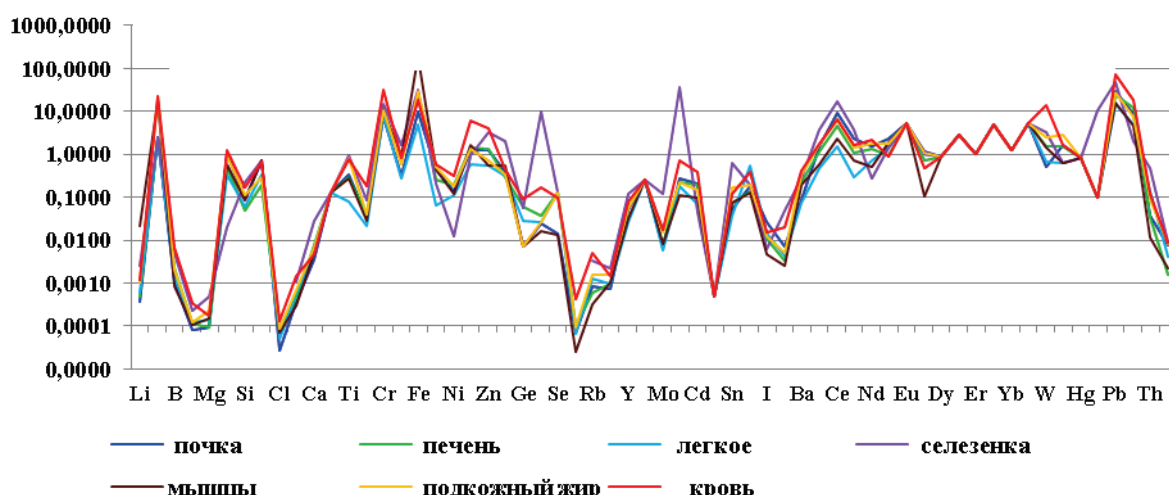


Рис. 6. Нормированная, относительно океанической воды [25], кривая распределения химических элементов в воде, выделенной из органов и тканей свиньи домашней (*S.S. Domestica L.*)

Fig. 6. Chemical elements centile curve in biological water of domestic pig (*S.S. Domestica L.*) rated with respect of ocean water [25]

Нормированная кривая распределения элементов данного материала (рис. 6) относительно морской воды по Р. Хорну [25] показывает некоторое обогащение биологической жидкости Be, Cr, Fe, Cu, Zn, Ga, Pb, Bi и многими редкими землями, близкое к их содержанию в океанической воде. Жидкость, выделенная из селезенки, обогащена As и Ag, а полученная из мышцы – Fe.

Почки характеризуются максимальным содержанием  $\text{SO}_4^{2-}$  (рис. 7), тогда как в крови накапливается  $\text{Cl}^-$  (рис. 7). Близость состава крови к составу морской воды может объяснять присутствие хлорид-иона, являющегося одним из ведущих ионов соленой воды, в высоких концентрациях в водной части изучаемой ткани.

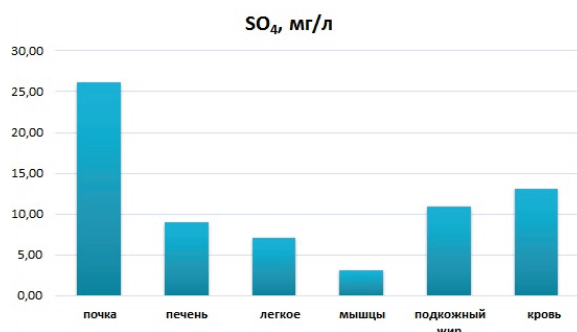


Рис. 7. Уровни концентрирования  $\text{SO}_4^{2-}$  в воде из органов и тканей свиньи домашней (*S.S. Domestica L.*)

Fig. 7. Concentration level of  $\text{SO}_4^{2-}$  in biological water of domestic pig (*S.S. Domestica L.*)

Йод накапливается преимущественно в биологической жидкости почек, где его содержание на порядок выше, чем в жидкостях других изученных материалов (рис. 9). Возможно, участие неотделенных при отборе проб надпочечников в гормональной регуляции повлияло на такое концентрирование данного элемента.

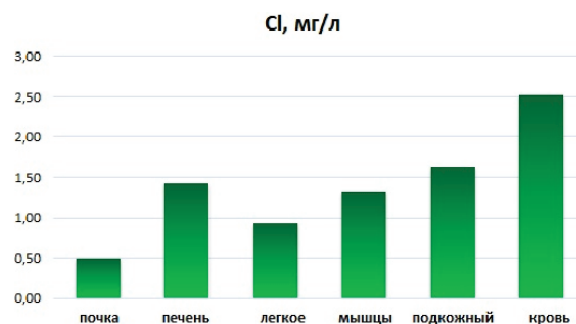


Рис. 8. Уровни концентрирования Cl в воде из органов и тканей свиньи домашней (*S.S. Domestica L.*)

Fig. 8. Concentration level of Cl in biological water of domestic pig (*S.S. Domestica L.*)

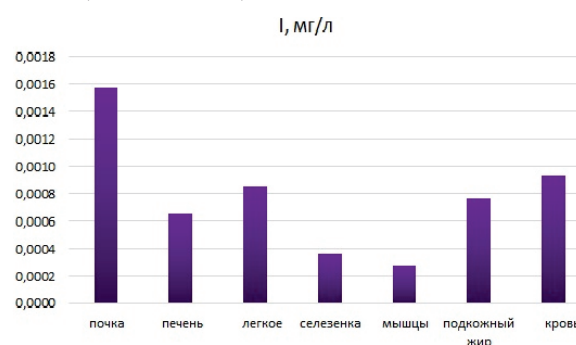


Рис. 9. Уровни концентрирования I в воде из органов и тканей свиньи домашней (*S.S. Domestica L.*)

Fig. 9. Concentration level of I in biological water of domestic pig (*S.S. Domestica L.*)

## Выводы

1. Впервые выполнены исследования по изучению характера накопления химических элементов в воде биологической, выделенной из органов и тканей модельного вида живого орга-



- низма на примере свиньи домашней (SUS SCROFA DOMESTICA L.).
2. Элементный состав жидкости изученных органов и тканей весьма разнообразен. Из 70 изученных элементов таблицы Д.И. Менделеева только 17 компонентов: Sc, Ru, Rh, Pd, In, Te, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Os, Ir, Pt, Hg, Re, содержатся ниже предела обнаружения.
  3. Распределение изученных химических элементов, встречающихся во всех изученных органах и тканях животного в значимых количествах, соответствует двум основным геохимическим закономерностям распределения элементов в материальных объектах Мира: закону Кларка–Менделеева–Вернадского о преобладании легких элементов над тяжелыми и закону Оддо–Гаркинса о распределении четных и нечетных элементов.
  4. Вода каждого органа или ткани имеет своё геохимическое «лицо» как по степени накопления элементов, так и по их соотношениям.
  5. Максимальное концентрирование элементов фиксируется в воде биологической, выделенной из крови (25); 19 – в жидкости, полученной из селезенки, активно участвующей в процессе лимфо- и кровообращения. Все другие органы и ткани содержат значительно меньшие концентрации: почки – 4 (Al, Sm, Gd, I), подкожный жир – 4 (Be, Ba, Gd, Au), мышцы – 3 (Li, W, Fe), легкие – 2 (Sb, Ta).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера / сост. Н.А. Костяшкин, Е.М. Гончарова. – М.: Айрис-пресс, 2004. – 576 с.
2. Вернадский В.И. История природных вод / отв. ред. С.Л. Шварцев, Ф.Т. Яшина. – М.: Наука, 2003. – 750 с.
3. Физиология человека: атлас динамических систем / К.В. Судakov, В.В. Андрианов, Ю.Е. Вагин, И.И. Киселев. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 416 с.
4. Macro- and microelements in the rat liver, kidneys, and brain tissues; sex differences and effect of blood removal by perfusion in vivo / T. Orct, J. Jurasović, V. Micek, D. Karaica, I. Sabolić // Trace Elements in Medicine and Biology. – 2017. – № 40. – P. 104–111.
5. Kakuschke A., Griesel S. Essential and Toxic Elements in Blood Samples of Harbor Seals (Phoca vitulina) from the Islands Helgoland (North Sea) and Anholt (Baltic Sea): a Comparison Study with Urbanized Areas // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. – 2016. – № 70. – P. 67–74.
6. The metal and metalloprotein profile of human plasma as biomarkers for stroke diagnosis / K.S. Nahana, K.B. Walshb, O. Adeoyeb, J.A. Landero-Figueroa // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2017. – № 42. – P. 81–91.
7. Elemental analysis of serum and hair from pre-eclamptic South African women / K. Maduraya, J. Moodleyb, C. Soobramoneya, R. Moodleyc, T. Naickera // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2017. – № 43. – P. 1–7.
8. Lead, cadmium and mercury in cerebrospinal fluid and risk of a myotrophic lateral sclerosis: a case-control study / M. Vincetia, T. Filippinia, J. Mandriolic, F. Viola, A. Bargellinia, J. Weuveb, N. Finic, P. Grilld, B. Michalkeda // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2016. – № 41. – P. 1–5.
9. Брин В.Б. Физиология человека в схемах и таблицах. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 1999. – 352 с.
10. Skelton H. The storage of water by various tissues of the body // Archives of Internal Medicine. – 1926. – V. 2. – № 40. – P. 140–152.
11. Pitts R.F. Physiology of the kidney and body fluids // Year Book Medical Publishers. – 1968. – № 63. – P. 439–440.
12. Bernard C. Lecons sur les phenomenes de la vie communs aux animaux et aux vegetaux. – Paris: Baillere, 1885. – 464 p.
13. Watson P.E., Watson I.D., Batt R.D. Total body water volumes for adult males and females estimated from simple anthropometric measurements // The American journal of Clinical Nutrition. – 1980. – № 33. – P. 27–39.
14. Биологическая химия / В. К. Кухта, Т.С. Морозкина, Э.И. Олецкий, А.Д. Таганович. – М.: Вином-Асар, 2008. – 688 с.
15. Очерки геохимии человека: монография / Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, Т.Н. Игнатова и др. – Томск: Дельтаплан, 2015. – 378 с.
16. Химический элементный состав органов и тканей человека и его экологическое значение / Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, Т.Н. Игнатова и др. // Геохимия. – 2011. – № 7. – С. 779–784.
17. Кузнецов В.В. Влияние некоторых эймериостатических препаратов и схем профилактики эймериоза на клинический статус и энтеробиоценоз цыплят-бройлеров: дис.... канд. вет. наук. – Тюмень, 2006. – 122 с.
18. Mineral composition and toxic element levels of muscle, liver and kidney of intensive (Swedish Landrace) and extensive (Mangulica) pigs from Serbia / D. Nikolic, J. Djinic-Stojanovic, S. Janovic, N. Stanisic, C. Radovic, L. Pezo, M. Lausevic // Food Additives & Contaminants: Part A. – 2017. – V. 6. – № 34. – P. 1–22.
19. Effects of Pig Slurry as Basal and Panicle Fertilizer on Trace Element Content and Grain Quality in Direct-Seeding Rice /



- L. Huang, J. Yang, W. Gao, W. Yang, X. Cui, H. Zhuang // Sustainability. – 2016. – № 8. – P. 714–728.
20. Zhao Y., Wang D., Yang S. Effect of organic and conventional rearing system on the mineral content of pork // Meat Science. – 2016. – № 118. – P. 103–107.
21. Барановская Н.В., Рихванов Л.П. Элементный состав органов и тканей домашних животных (*Sus scrofa domestica* (Artiodactyla, Mammalia)) как индикатор среды обитания // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2011. – № 3 (17). – P. 74–84.
22. Капельст И.В., Алексеев А.Л. Показатели качества и физико-химические свойства мышечной ткани свиней мясных пород и типов // Современные тенденции развития агропромышленного комплекса. – 2006. – № 3. – С. 146–147.
23. Бородин Ю.И., Голубева И.А., Машак А.Н. Лимфатическая система и водный гомеостаз // Морфология. – 2005. – Т. 128. – № 4. – С. 60–64.
24. Рихванов Л.П. Радиоактивность и радиоактивные элементы как фактор геологической среды и его использование в науках о земле // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 12. – С. 55–61.
25. Хорн Р. Морская химия (структура воды и химия гидросферы). – М.: Мир, 1972. – 380 с.
26. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. – М.: Недра, 1996. – 425 с.

Поступила 10.11.2018 г.

### Информация об авторах

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

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

**Корогод Н.П.**, кандидат биологических наук, доцент кафедры общей биологии факультета математики и естествознания Павлодарского государственного педагогического университета.

**Хвощевская А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая лабораторией «Гидрогеохимия» отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Копылова Ю.Г.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, начальник НОЦ «Вода» отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мазурова И.С.**, инженер-исследователь ПНИЛ «Гидрогеохимия» отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Муканова Р.Ж.**, кандидат химических наук, доцент факультета математики и естествознания кафедры общей химии Павлодарского государственного педагогического университета.

**Туркбенов Т.К.**, кандидат химических наук, доцент факультета математики и естествознания кафедры общей химии Павлодарского государственного педагогического университета.

**Скрипник М.И.**, магистрант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

UDC 577.1

## ELEMENTAL COMPOSITION OF BIOLOGICAL WATER AS AN INDICATOR OF TECHNOGENESIS

**Leonid P. Rikhvanov<sup>1</sup>,**  
rikhvanov@tpu.ru

**Natalia V. Baranovskaya<sup>1</sup>,**  
nata@tpu.ru

**Natalia P. Korogod<sup>2</sup>,**  
natalya\_korogod@mail.ru

**Albina A. Khvashchevskaya<sup>1</sup>,**  
unpc\_voda@mail.ru

**Yuliya G. Kopylova<sup>1</sup>,**  
unpc\_voda@mail.ru

**Irina S. Mazurova<sup>1</sup>,**  
unpc\_voda@mail.ru

**Roza Zh. Mukanova<sup>2</sup>,**  
rozam14@mail.ru

**Timur K. Turkbenov<sup>2</sup>,**  
turbenovtk@yandex.ru

**Mariya I. Skripnik<sup>1</sup>,**  
mtmmashulia@mail.ru

**Aleksandra I. Belyanovskaya<sup>1</sup>,**  
aib28@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Pavlodar State Pedagogical University,  
60, Mira street, Pavlodar, 140000, Kazakhstan.

*Technogenesis is a global process affecting all geospheric shells of the Earth. Indication of the impact of industrial facilities is carried out using a set of methods, including biogeochemical studies and monitoring. Their organization requires constant development and improvement of both technical means of analysis and methodological approaches; scientists of the entire world community are making efforts to search for new indicator objects that most adequately reflect the technological consequences for the environment and public health. Water can be used as such an indicator. Water has enormous ecological functions in general and special functions for a living organism, but, in spite of the significant role and long history of research, its chemical composition is poorly studied. 0,0003 % of Earth's resources accounts for water referring to «biological water» by the definition of V.I. Vernadsky. However, the change in its elemental composition is the most objective indicator of the technogenic transformation that occurs under the influence of various industrial objects. The works showing the background chemical composition of this resource are the basis for organization of monitoring research in the areas of intensive man-made pressure.*

**The relevance** of the study is determined by the lack of detailed study of a wide range of chemical elements in the composition of individual organs and tissues of living organisms, including the water in them. This substance reflects the chemical composition of environment and may be the subject to monitoring. The chemical proximity of the organism of the domestic pig to the human's one allows obtaining a new tool for assessing the quality of the human places of residence, which directly assesses the body, which will significantly increase the objectivity of research.

**The aim** of the work is to study the chemical composition of biological water of individual organs and tissues, on the example of domestic pigs, to obtain background characteristics for biogeochemical monitoring.

**The methods.** Organs and tissues of seven-month domestic pig was sampled in Uspenka village, Pavlodar region (Kazakhstan) just after the slaughter and packed in plastics packages. Biological water was exudated by vacuum sublimation method upon the application of heat. The exudate was analyzed in certificated scientific-education center «Water» at Tomsk Polytechnic University by the method of inductively coupled plasma mass spectrometry according to the certified HCAM 480X method with NeXION 300D spectrometer.

**Result.** The authors have studied the composition and characteristics of distribution of 70 chemical elements in biological water, separated by vacuum sublimation from the organs and tissues of the domestic pig, selected on the territory of the conditionally environmentally friendly village Uspenka, Pavlodar region. The interrelation between the elemental composition of the biological fluid and the physiological functions of the organs of the animals studied as well as the composition of the habitat was revealed.

### Key words:

Technogenesis, biogeochemistry, biological water, chemical elements, vacuum sublimation method, ICP-MS, geochemical indicator, background monitoring.

*The authors thank O.E. Akbasheva, Dr. Sc., professor (Siberian State Medical University, Tomsk), for useful discussion and comments made on the manuscript of the article.*

### REFERENCES

1. Vernadskiy V.I. *Biosfera i noosfera* [Biosphere and noosphere]. Composed by N.A. Kostyashkin, E.M. Goncharova. Moscow, Ayris-Press, 2004. 576 p.
2. Vernadskiy V.I. *Istoriya prirodnikh vod* [History of natural water]. Eds. S.L. Shvartsev, F.T. Yashina. Moscow, Nauka Publ., 2003. 750 p.
3. Sudakov K.V., Andrianov V.V., Vagin Yu.E., Kiselev I.I. *Fiziologiya cheloveka: Atlas dinamicheskikh sistem* [Human Physiology: Atlas of Dynamic Systems]. Moscow, GEOTAR – Media Publ., 2009. 416 p.
4. Orct T., Jurasović J., Micek V., Karaica D., Sabolić I. Macro- and microelements in the rat liver, kidneys, and brain tissues; sex differences and effect of blood removal by perfusion in vivo. *Trace Elements in Medicine and Biology*, 2017, no. 40, pp. 104–111.

5. Kakuschke A., Griesel S. Essential and Toxic Elements in Blood Samples of Harbor Seals (*Phoca vitulina*) from the Islands Helgoland (North Sea) and Anholt (Baltic Sea): A Comparison Study with Urbanized Areas. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, no. 70, pp. 67–74.
6. Nahana K.S., Walsh K.B., Adeoye O., Landero-Figueroa J.A. The metal and metalloprotein profile of human plasma as biomarkers for stroke diagnosis. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2017, no. 42, pp. 81–91.
7. Maduraya K., Moodley J., Soobramoney C., Moodley R., Naicker T. Elemental analysis of serum and hair from pre-eclamptic South African women. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2017, no. 43, pp. 1–7.
8. Vincetia M., Filipina T., Mandriolic J., Viola F., Bargellina A., Weuve J., Finic N., Grillo P., Michalka B. Lead, cadmium and mercury in cerebrospinal fluid and risk of amyotrophic lateral sclerosis: a case-control study. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2016, no. 41, pp. 1–5.
9. Brin V.B. *Fiziologiya cheloveka v skhemakh i tablitsakh* [Human physiology in charts and tables]. Rostov-on Don, Feniks Publ., 1999. 352 p.
10. Skelton H. The storage of water by various tissues of the body. *Archives of Internal Medicine*, 1926, vol. 2, no. 40, pp. 140–152.
11. Pitts R.F. Physiology of the kidney and body fluids. *Year Book Medical Publishers*, 1968, no. 63, pp. 439–440.
12. Bernard C. *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* [Lessons on the phenomena of life common to animals and plants]. Paris, Baillière Publ., 1885. 464 p. In Fr.
13. Watson P.E., Watson I.D., Batt R.D. Total body water volumes for adult males and females estimated from simple anthropometric measurements. *The American journal of Clinical Nutrition*, 1980, no. 33, pp. 27–39.
14. Kukhta V.K., Morozkina T.S., Oletskiy E.I., Taganovich A.D. *Biologicheskaya khimiya* [Biochemistry]. Moscow, Binom-Asar Publ., 2008. 688 p.
15. Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Ignatova T.N. *Ocherki geokhimii cheloveka: monografiya* [Human geochemistry essays: monograph]. Tomsk, TPU Publ. house, 2015. 378 p.
16. Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Ignatova T.N. Khimicheskii elementny sostav organov i tkaney cheloveka i ego ekologicheskoe znachenie [Chemical elemental composition of human organs and tissues and its ecological significance]. *Geochemistry*, 2011, no. 7, pp. 779–784.
17. Kuznetsov V.V. *Vliyanie nekotorykh eymeriostatsicheskikh preparatov i skhem profilaktiki eymerioza na klinicheskiy status i enterobiosenoz tsyplyat-broylerov*. Dis. Kand. Nauk [The effect of some eimeriostatic drugs and schemes for prevention of eimeriosis on clinical status and enterobiosenosis of broiler chickens. Cand. Diss.] Tyumen, 2006. 122 p.
18. Nikolic D., Djinic-Stojanovic J., Jankovic S., Stanisic N., Radovic C., Pezo L., Lausevic M. Mineral composition and toxic element levels of muscle, liver and kidney of intensive (Swedish Landrace) and extensive (Mangulica) pigs from Serbia. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2017, vol. 6, no. 34, pp. 1–22.
19. Huang L., Yang J., Gao W., Yang W., Cui X., Zhuang H. Effects of Pig Slurry as Basal and Panicle Fertilizer on Trace Element Content and Grain Quality in Direct-Seeding Rice. *Sustainability*, 2016, no. 8, pp. 714–728.
20. Zhao Y., Wang D., Yang S. Effect of organic and conventional rearing system on the mineral content of pork. *Meat Science*, 2016, no. 118, pp. 103–107.
21. Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P. Elementny sostav organov i tkaney domashnikh zhivotnykh (*Sus scrofa domestica* (Artiodactyla, Mammalia)) kak indikator sredy obitaniya [Elemental composition of organs and tissues of domestic animals (*Sus scrofa domestica* (Artiodactyla, Mammalia)) as an indicator of habitat]. *Problemy biogeokhimii i geokhimicheskoy ekologii*, 2011, no. 3 (17), pp. 74–84.
22. Kapelst I.V., Alekseev A.L. Pokazateli kachestva i fiziko-khimicheskie svoystva myshechnoy tkani svinей myasnykh porod i tipov [Indicators of quality and physico-chemical properties of muscle tissue of pigs of meat breeds and types]. *Sovremennye tendentsii razvitiya agropromyshlennogo kompleksa*, 2006, no. 3, pp. 146–147.
23. Borodin Yu.I., Golubeva I.A., Mashak A.N. *Limfoticheskaya sistema i vodnyy gomeostaz* [Lymphatic system and homeostasis]. *Morfologiya*, 2005, vol. 128, no. 4, pp. 60–64.
24. Rikhvanov L.P. Radioaktivnost i radioaktivnye elementy kak faktor geologicheskoy sredy i ego ispolzovanie v naukakh o zemle [Radioactivity and radioactive elements as the factor of geological environment and its use in earth sciences]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2017, no. 12, pp. 55–61.
25. Khorn R. *Morskaya khimiya (struktura vody i khimiya gidrosfery)* [Marine chemistry (structure of water and chemistry of the hydrosphere)]. Moscow, Mir Publ., 1972. 380 p.
26. Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General Hydrology]. Moscow, Nedra Publ., 1996. 425p.

Received: 10 November 2018.

#### Information about the authors

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

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

**Natalia P. Korogod**, Cand. Sc., associate professor, Pavlodar State Pedagogical University.

**Albina A. Khvashchinskaya**, Cand. Sc., head of laboratory «Hydrogeochemistry», National Research Tomsk Polytechnic University.

**Yuliya G. Kopylova**, Cand. Sc., senior scientific worker, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Irina S. Mazurova**, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Roza Zh. Mukanova**, Cand. Sc., associate professor, Pavlodar State Pedagogical University.

**Timur K. Turkbenov**, Cand. Sc., associate professor, Pavlodar State Pedagogical University.

**Mariya I. Skripnik**, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksandra I. Belyanovskaya**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.5(263.53)

## ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ОСАДОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ (МЫС МУОСТАХ)

Перевертайло Татьяна Геннадьевна<sup>1</sup>,  
ptg@tpu.ru

Кажумуханова Малика Зейнеллаевна<sup>2</sup>,  
kazhumukhanova@gmail.com

Недоливко Наталья Михайловна<sup>1</sup>,  
nedolivko@tpu.ru

Гринько Андрей Алексеевич<sup>1</sup>,  
grinko@tpu.ru

Шахова Наталья Евгеньевна<sup>1</sup>,  
shahova@tpu.ru

Дударев Олег Викторович<sup>3,1</sup>,  
dudarev@poi.dvo.ru

Гершелis Елена Владимировна<sup>1</sup>,  
elenapanova@tpu.ru

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

Семилетов Игорь Петрович<sup>3,1</sup>,  
ipsemiletov@alaska.edu

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

<sup>2</sup> ТОО «Казцинк»,  
Республика Казахстан, г. Кокшетау, ул. Абая, 96.

<sup>3</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук,  
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

**Актуальность** исследования продиктована необходимостью изучения современных изменений климата, которые рассматриваются как последствия парникового эффекта, обусловленного ростом содержания в атмосфере основных парниковых газов – двуокиси углерода и метана. Для изучения этой проблемы и построения модели климата необходимо проведение комплексных исследований в системе суша–шельф–атмосфера на Арктическом шельфе, включая оценку потенциала морей Восточной Арктики в контексте особенностей литологического состава и трансформации органического вещества в углеводороды в процессе диагенетических и катагенетических преобразований.

**Цель:** изучение литологического и минералогического составов, изменчивости содержания органического вещества ( $C_{org}$ ), молекулярного и изотопного состава углерода ( $\delta^{13}C$ ) в отложениях ледового комплекса побережья моря Лаптевых (мыс Муостах).

**Объект:** пробы современных донных осадков, отобранных в ходе проведения экспедиционных работ 2015 г. в юго-восточной части моря Лаптевых.

**Методика** исследования донных отложений включает в себя пробоподготовку, лабораторно-аналитические исследования (хроматомасс-спектрометрия, пиролиз, изотопия, рентгенофазовый анализ, методы обработки и интерпретации результатов).

**Результаты.** Изучен минералогический состав глинистой фракции, установлена зональность распределения глинистых минералов. Выявлены особенности состава органического вещества на молекулярном и изотопном уровнях. Получены первые результаты по потенциалу генерации углеводородов из органического вещества осадков ледового комплекса, которые доминируют в мелководной части Восточно-Сибирского шельфа. Результаты исследований, полученные по данным пиролиза и хроматомасс-спектрометрии, имеют высокую степень корреляции и отражают комплекс биохимических процессов, сопровождающих превращение органического вещества на различных стадиях литогенеза. Кроме того, приведены первые оценки потенциала генерации легких углеводородов из  $C_{org}$  исследуемых осадков.

### Ключевые слова:

Органическое вещество, донные осадки, изотопный анализ, хроматомасс-спектрометрия, минералогический состав, море Лаптевых, мыс Муостах.

### Введение

В настоящее время современные изменения климата рассматриваются как последствия парникового эффекта, обусловленного ростом содержания в атмосфере основных парниковых газов – двуокиси углерода и метана ( $CO_2$  и  $CH_4$ ) [1, 2]. Основным источником  $CO_2$  является аэробное окисление органического вещества (ОВ), а  $CH_4$  – деградация подводной мерзлоты, дестабилизация метановых гидратов и мобилизация глубинных, возможно, абиогенных источников  $CH_4$  [3–8].

Показано, что моря Восточной Арктики (МВА) являются источником метана в атмосферу Арктического региона, вклад которого соизмерим с вкладом всего Мирового океана и обусловлен деградацией подводной мерзлоты [7, 9, 10]. Проведенные ранее исследования [5, 6] выявили на территории моря Лаптевых около 200 мощных факелов с рекордно высокой концентрацией метана (до 6000 нМ). Комплексные гидроакустические и гидрофизические исследования позволили идентифицировать корни факелов пузырькового метана в



толще донных отложений, обогащенных ОВ. Дальнейшие диагенетические и катагенетические трансформации ОВ приводят к формированию гигантского углеводородного пула на шельфе МВА [5, 6], который вовлекается в современные биогеохимические и климатические процессы через таликовые зоны, формирующиеся в результате деградации подводной мерзлоты [3, 7, 9–11].

Исследования последних 20 лет подтвердили гипотезу о том, что основным источником  $\text{CO}_2$  на шельфе МВА является окисление эрозионного углерода ледового комплекса (ЛК) прибрежной мерзлоты, что приводит к ряду экологических проблем, обусловленных экстремальной асидификацией вод МВА [12–15]. Было показано, что эрозионный углерод ЛК определяет современный осадочный и биогеохимический режим от прибрежной зоны до изобаты примерно 40 м – более 70 % акватории МВА [15, 16]. Более того, прогрессирующая деградация подводной мерзлоты, которая содержит фрагменты погребенного ЛК, может привести к значительному увеличению эмиссии  $\text{CH}_4$  за счет формирования открытых таликов [3, 9–11, 17].

Предполагается, что дальнейшее потепление климата и увеличение жидкого и твердого материкового стока, а также прогрессирующая деградация наземной и подводной мерзлоты приведут к усилению атмосферной эмиссии парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) [1, 3], в особенности – к усилению массированного выброса  $\text{CH}_4$  [3, 6, 12]. Для изучения этой проблемы и построения модели климата необходимо проведение более комплексных исследований в системе суша–шельф–атмосфера на Арктическом шельфе, включая оценку потенциала МВА в контексте особенностей литологического

состава и трансформации органического вещества в углеводороды в процессах диагенетических и катагенетических трансформаций [7, 17–23].

#### Цель и объект исследования

Основной целью данной работы являлось изучение литологического и минералогического составов, изменчивости содержания органического вещества ( $C_{\text{орг}}$ ), молекулярного и изотопного состава углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) в отложениях ЛК побережья моря Лаптевых. Кроме того, приведены первые оценки потенциала генерации легких углеводородов из  $C_{\text{орг}}$  исследуемых осадков МВА.

Представлены результаты лабораторно-аналитических исследований проб современных осадков, отобранных в ходе проведения экспедиционных работ 2015 г. в юго-восточной части моря Лаптевых (рис. 1).

Высокая скорость береговых эрозионных процессов, которая проявляется в экспорте огромного количества эрозионного  $C_{\text{орг}}$  на шельф МВА, обусловила необходимость проведения более детальных работ, направленных на понимание исходного (end-member) литологического, молекулярного и изотопного состава, а также углеводородного потенциала  $C_{\text{орг}}$  образцов осадочного материала, отобранных вдоль разреза сверху вниз по клифу мыса Муостях Быковского полуострова, в конусе выноса и волноприбойной нише.

#### Методика исследований

Методика исследований донных отложений включает в себя пробоподготовку, лабораторно-аналитические исследования, методы обработки и интерпретации результатов.

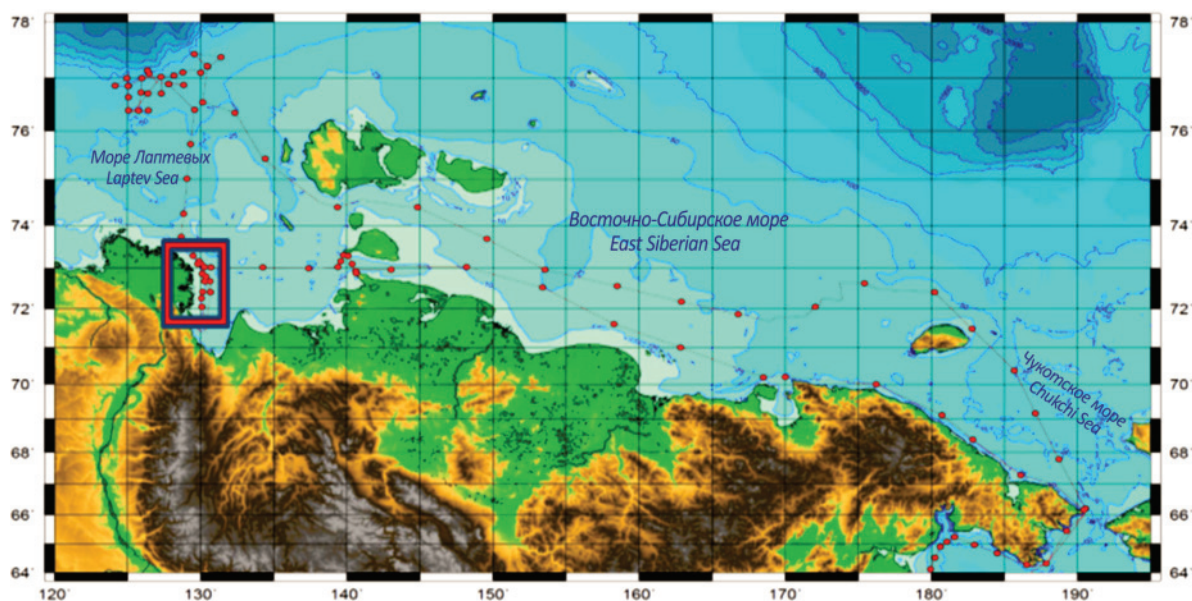


Рис. 1. Район исследований. Район работ выделен в красный квадрат. Красными точками показано положение океанологических станций с отбором образцов осадков для дальнейших исследований

Fig. 1. Study area. Sampling area for the present study is highlighted with the red square. Red dots indicate sampling stations for further studies not included in the present paper

- Отобранные образцы хранили при  $t = -18^\circ\text{C}$ .
1. На этапе пробоподготовки проводилось размораживание образцов при комнатной температуре в течение суток, гомогенизация, доведение образцов до постоянного веса в сушильном шкафу при  $t = +45^\circ\text{C}$  и экстрагирование хлороформом в аппарате Сокслета в течение 14 ч. Далее экстракты концентрировались на роторном испарителе и сушились до постоянного веса.

Полученные экстракты исследовали методом хроматомакс-спектрометрии (ХМС) на приборе SCION 436 GC TQ фирмы «Bruker» с использованием кварцевой капиллярной колонки HP-5MS (длина 30 м, внутренний диаметр 0,25 мм, толщина пленки 0,25 мкм). Условия анализа: Температура испарителя  $300^\circ\text{C}$ , температурная программа – начальная  $t = +40^\circ\text{C}$ , нагрев  $5^\circ\text{C}/\text{мин}$  до  $150^\circ\text{C}$ ,  $3^\circ\text{C}/\text{мин}$  до  $310^\circ\text{C}$ , выдержка при  $310^\circ\text{C}$  – 20 мин. Скорость газа-носителя (гелий) – 1,1 мл/мин, объем вводимой пробы – 1 мкл (растворитель гексан). Измерения проводились как по полному ионному току, так и по выбранным ионам (в режимах Scan и SIM), а также в режиме MS-MS на приборе GCMS Agilent 7890B (GC) – Agilent Q-TOF 7200 (MS) при той же температурной программе (колонка кварцевая капиллярная HP-1MS, длина 30 м, внутренний диаметр 0,25 мм, толщина фазы 0,25 мкм) с вторичной ионизацией в ячейке соударения с азотом при энергии соударения 15 эВ. Дополнительно на SCION 436 GC TQ для подтверждения результатов идентификации отдельных соединений хроматограммы образцов снимались в режиме MRM с вторичной ионизацией в ячейке соударения с аргонном, контролировались переходы  $M^+ = 410, 412 \text{ а. е. м} \rightarrow 81, 69, 95, 121, 137, 189, 190, 191, 192$ .

Идентификация компонентов осуществлялась по масс-спектрометрическим библиотекам NIST 14, а также по детальному изучению масс-спектра осколочных и молекулярных ионов с использованием справочной литературы по масс-спектрометрии, ранее проанализированных в лаборатории образцов экстрактов пород и нефтей, а также стандартов, предоставленных фирмой Chiron. Относительные концентрации компонентов определяли методом внутренней нормализации [24–29].

2. Определение общего содержания органического углерода, легколетучих органических соединений в осадках. Исследования проводились в Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Томского политехнического университета на пиролизаторе «Rock-Eval 6 Turbo» VINCI Technologies. Старт нагрева образца –  $300^\circ\text{C}$ , выдержка 3 мин, далее нагрев до  $650^\circ\text{C}$  со скоростью  $25^\circ\text{C}/\text{мин}$  [30–32].
3. Определение изотопного состава органического углерода в декарбонатизированных образцах донных отложений проводили на изотопном масс-спектрометре DELTA V ADVANTAGE (производитель «Thermo Fisher Scientific») в

лаборатории геохимии и пластовых нефтей ОАО «ТомскНИПИнефть» (г. Томск).

4. Минералогический состав глинистой фракции изучался методом рентгеновской дифракции (РФА). Процедура проведения РФА состоит из следующих этапов:

- подготовка образцов для съемки дифрактограмм;
- съёмка и запись дифрактограмм;
- качественная и количественная интерпретация дифрактограмм.

Для анализа глинистых минералов пробоподготовка, заключающаяся в выделении пелитовой фракции ( $<5 \text{ мкм}$ ) из основной массы породы, производится в несколько этапов:

- механическое дробление образцов на щековой дробилке Fritsch «Pulverisette 1»;
- ручное щадящее дробление в фарфоровой или металлической ступке;
- мокрое просеивание полученной пробы через сито с размером ячеек 0,10 или 0,25 мм в зависимости от её зернистости для удаления крупных частиц;
- тщательное перемешивание (гомогенизация) пробы;
- перетирание пробы в фарфоровой ступке с удалением насыщенной суспензии в отдельный стакан;
- обработка суспензии ультразвуком при частоте 22 кГц в течение 5 минут с целью выделения тонких фракций из песчано-глинистой породы, а также очистки поверхности зерен от различных примесей и загрязнений;
- диспергация суспензии смесью пирофосфата натрия, соды и добавок ПАВ, что обеспечивает получение глинистой суспензии высокого качества. Разбавление суспензии дистиллированной водой и отстаивание раствора в течение суток. Если столб воды прозрачный – процедура повторяется до тех пор, пока столб воды станет непрозрачным;
- центрифугирование взятой фракции для консолидации твёрдой части суспензии;
- помещение полученной суспензии в выпарные фарфоровые чашки и высушивание в сушильном шкафу при  $t = +45^\circ\text{C}$  или при комнатных условиях.
- пакетирование полученной пробы для дальнейшего хранения.

Съёмка дифрактограмм проводится при следующих параметрах: анод – Cu (медь), напряжение рентгеновской трубки – 40 кВ, ток – 30 мА, мощность – 1,2 кВт, скорость съёмки  $1^\circ/\text{мин}$ , шаг  $0,02^\circ$ , углы съёмки  $2\Theta$  от  $3^\circ$  до  $65^\circ$ .

Интерпретация дифрактограмм включает в себя следующие операции: идентификация фазового состава исследованного образца путем сопоставления наблюдаемого набора углов дифракционных максимумов или набора межплоскостных расстояний с данными компьютерных баз данных; построение моделей кристаллической структуры для

всех установленных кристаллических фаз; симуляция суммарной дифракционной картины для всех обнаруженных фаз; расчет количественного содержания фаз в образце с использованием метода полнопрофильного анализа [33–35].

### Результаты исследований

Согласно данным РФА, основу минералогического состава отложений составляют каркасные минералы – кварц и полевые шпаты (рис. 2), содержание которых достигает 71,9...82,7 %. Полевые шпаты в изученных образцах представлены в основном плагиоклазами, тогда как калиевый полевой шпат присутствует в осадках в незначительных количествах. Доля калиевых полевых шпатов составляет в среднем около 6 %, плагиоклазов – 26 %, при общем содержании полевых шпатов до 36 %.

В осадках присутствуют гидрослюды группы мусковита (иллит-мусковит) – самого стойкого к выветриванию слоистого силиката, содержание которого в среднем составляет 14,6 %.

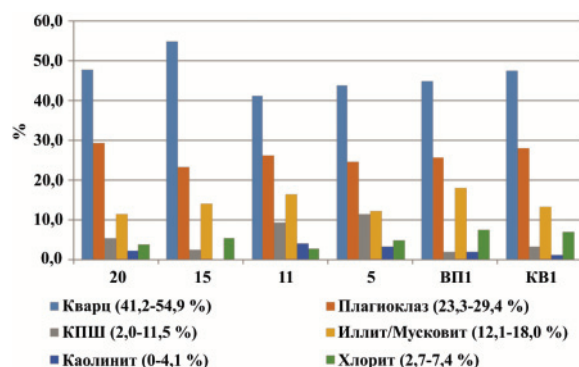
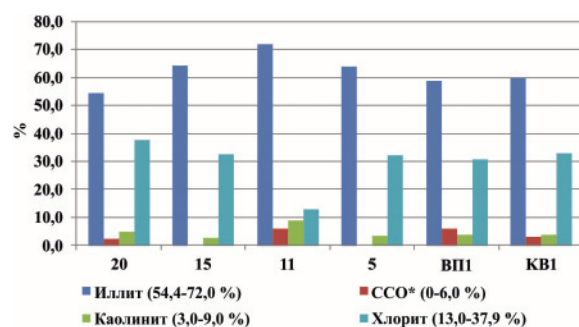


Рис. 2. Общий минералогический состав осадочного материала мыса Муостакх

Fig. 2. Total mineralogical composition of the surface sediments (Cape Muostakh)

Глинистые минералы (рис. 3) представлены каолинитом, хлоритом и иллитом и их содержание в осадочном материале не превышает 27 %. Смешаннослойные образования обнаружены в образцах, отобранных на абсолютных отметках 20, 11 м, волноприбойной нише и конусе выноса.



\*ССО – смешаннослойные отложения/mixed layer sediments

Рис. 3. Содержание глинистых минералов в отложениях мыса Муостакх

Fig. 3. Clay minerals content in the surface sediments (Cape Muostakh)

В горизонтах с уменьшением суммарного содержания глинистых минералов происходит увеличение содержания кварца и резкое уменьшение относительного содержания каолинита и, наоборот, – с увеличением доли глинистых минералов наблюдается уменьшение содержания кварца, а среди глинистых минералов возрастает количество каолинита.

Зональность глинистых минералов заключается в следующем: вниз по разрезу уменьшается доля хлорита, возрастает количество иллита, каолинита и смешаннослойных образований, достигая максимальных концентраций на высоте 11 м, что указывает на континентальный генезис осадко-накопления.

Содержание  $\delta^{13}\text{C}$  в исследуемых образцах варьирует в широких пределах (от  $-23$  до  $-28$  ‰). Отложения, залегающие на абсолютной высоте от 5 до 15 м, обладают более тяжелым изотопным составом ( $\delta^{13}\text{C}$  от  $-23$  до  $-24$  ‰). Низкие значения ( $-27,2$  ‰;  $-28$  ‰) характерны для образцов с высоким содержанием  $C_{\text{орг}}$  (табл. 1).

Таблица 1. Геохимические коэффициенты и данные Rock-Eval анализа осадочного материала

Table 1. Rock-Eval analysis data and relevant geochemical indexes

№ образца Sample no.	Параметры Rock-Eval/Rock-Eval ratios							$\delta^{13}\text{C}$ , ‰
	S1	S2	S3	HI	OI	MinC	TOC	
	мг/г/mg/g						% мас./% wt.	
21,5	36,13	104,94	70,34	307	206	1,61	34,15	-28,00
20	5,20	15,74	6,78	294	127	0,22	5,35	-27,20
15	0,19	2,21	3,26	109	161	0,18	2,02	-24,30
11	0,13	1,39	2,62	81	152	0,15	1,72	-24,30
5	0,02	0,14	0,99	15	103	0,11	0,96	-23,60
ВП1	0,57	5,14	4,30	187	156	0,17	2,75	-26,20
КВ1	0,50	3,84	4,67	131	159	0,22	2,94	-27,60

Примечание: TOC – total organic carbon (количество органического углерода), % мас.; S1 – количество летучих ( $300^\circ\text{C}$ ) органических соединений, мг/г породы; S2 – количество летучих продуктов деградации органического вещества, мг/г породы; HI – водородный индекс  $S2 \times 100 / \text{TOC}$ , мг продуктов деградации/г органического углерода; MinC – содержание минерального углерода, % мас.

Note: TOC is the total organic carbon (amount of organic carbon), % by weight; S1 is the amount of volatile ( $300^\circ\text{C}$ ) organic compounds, mg/g of rock; S2 is the amount of volatile organic matter degradation products, mg/g of rock; HI is the hydrogen index  $S2 \times 100 / \text{TOC}$ , mg of degradation products/g of organic carbon; MinC is the mineral carbon content, % wt.

Содержание  $C_{\text{орг}}$  в исследованных пробах изменялось в пределах от 0,9 до 34,1 %, с содержанием летучих органических соединений (S1) от 0,02 до 36,13 мг/г породы.

Содержание высокомолекулярных органических веществ и соединений, образующихся в результате крекинга (S2) изменяется в широком интервале от 0,14 до 104,94 мг/г и содержание  $\text{CO}_2$  при крекинге остаточного органического вещества (S3) варьирует от 0,99 до 70,34 мг/г породы.

Таким образом, количество летучих органических соединений (количественно равное экстрагируемой части органического вещества породы – параметр S1) в осадках относительно невелико по



сравнению с продуктами высокотемпературной деградации органического вещества (параметр S2). Можно заключить, что основная масса органического вещества представлена высокомолекулярными нелетучими соединениями – биогеополимером.

Распределение суммарных показателей углеводородов (S1, S2, S3) в исследуемых пробах идентично распределению TOC (рис. 4), что подтверждается высокими положительными значениями коэффициента корреляции между S1, S2, S3 и TOC (табл. 2).

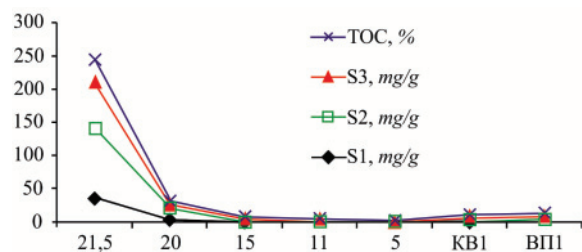


Рис. 4. Распределение суммарных показателей S1, S2, S3, TOC в пробах осадочного материала мыса Муостях

Fig. 4. Distribution of S1, S2, S3, TOC indices in sediments samples

Таблица 2. Значения коэффициентов парной корреляции между основными параметрами анализа Rock-Eval

Параметры/Ratios	S1	S2	S3	TOC
S1	1,0	0,9996	0,9959	0,9985
S2	0,9996	1,0	0,9970	0,9994
S3	0,9959	0,9970	1,0	0,9988
TOC	0,9985	0,9994	0,9988	1,0

Однако количественные соотношения индексов HI и OI в исследуемых пробах отличаются. В образцах, отобранных с абсолютных отметок (а. о.) в 21,5 и 20 м, высокий водородный индекс, следовательно, в нерастворимом органическом веществе (керогене) преобладают водородонасыщенные фрагменты, и их образование проходило в более восстановительной среде. В нижележащих отложениях клифа мыса Муостях более высокий кислородный индекс, следовательно – в керогене преобладают кислородные структуры, и осадконакопление проходило в более окисленной среде.

По полученным данным литологического анализа построен сводный геологический разрез обнажения мыса Муостях (рис. 5, а) и распределения органического вещества (TOC), органических сое-

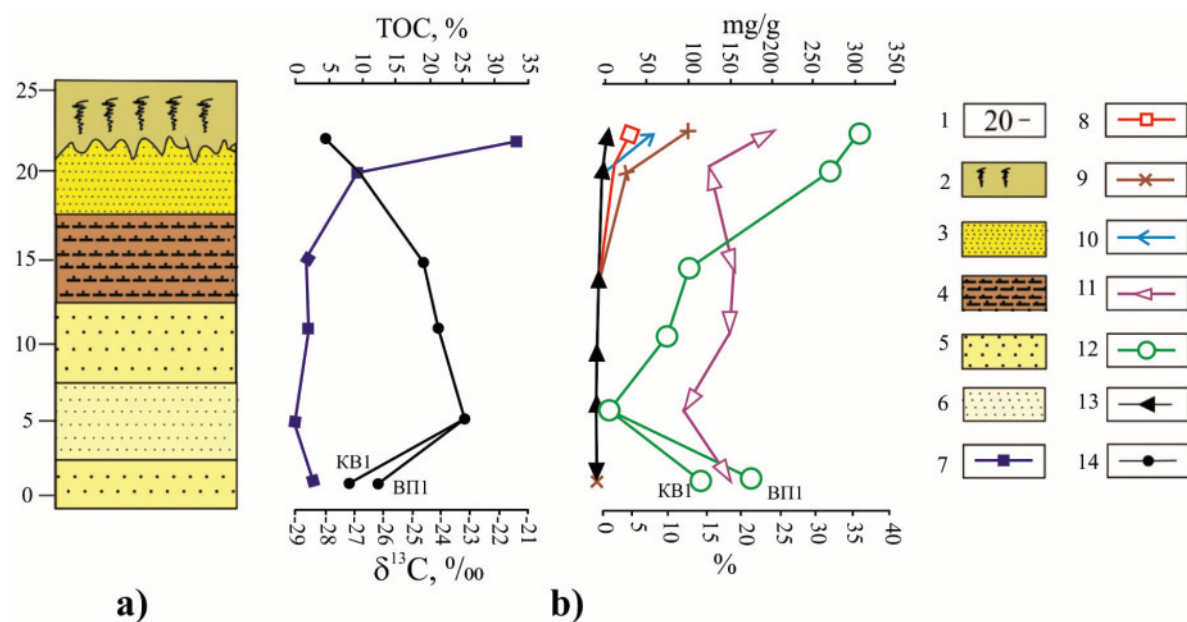


Рис. 5. Распределение органического углерода по разрезу ледового комплекса мыса Муостях: а) литологическая колонка; б) данные Rock-Eval анализа исследуемых проб. Условные обозначения: 1 – абсолютная высота над уровнем моря, м; 2 – дерново-торфяной покров; 3 – песок мелкозернистый; 4 – алеврит пелитовый; 5 – песок крупнозернистый; 6 – песок среднезернистый; 7 – распределение общего содержания органического углерода (TOC, %); 8 – S1 – количество летучих (300 °C) органических соединений, мг/г породы; 9 – S2 – количество летучих продуктов деградации органического вещества, мг/г породы; 10 – S3 – количество CO, выделившегося при пиролизе керогена и при низкотемпературном (<600 °C) разложении карбонатов, мг CO/г породы; 11 – HI – водородный индекс S2·100/TOC, мг продуктов деградации/г органического углерода; 12 – OI – кислородный индекс, мг CO/г C<sub>орг</sub>; 13 – MinC – содержание минерального углерода, % мас.; 14 – распределение изотопного состава органического углерода (δ<sup>13</sup>C, ‰)

Fig. 5. Distribution of organic carbon through the ICD cross-section (Cape Muostakh): а) lithological column; б) Rock-Eval analysis data. 1 is the absolute altitude above sea level, m; 2 is the sod-peat cover; 3 is the fine-grained sand; 4 is the pelitic silt; 5 is the coarse-grained sand; 6 is the medium-grained sand; 7 is the distribution of total organic carbon (TOC, %); 8 – S1 is the amount of volatile (300 °C) organic compounds, mg/g; 9 – S2 is the amount of volatile organic matter degradation products, mg/g; 10 – S3 is the amount of CO released during kerogen pyrolysis and low temperature (<600 °C) carbonates decomposition, mg CO/g; 11 – HI is the hydrogen index S2·100/TOC, mg of degradation products/g of C<sub>org</sub>; 12 – OI is the oxygen index, mg CO/g C<sub>org</sub>; 13 – MinC is the mineral carbon content by weight; 14 is the organic carbon isotope composition (δ<sup>13</sup>C, ‰)



динений и изотопного состава органического углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) (рис. 5, б).

Максимальные значения всех исследуемых параметров зафиксированы в верхней части разреза, представленной торфяником, затем исходные значения содержания  $C_{\text{орг}}$  к средней части разреза уменьшаются в среднем в 20 раз, на пляже – еще почти в 2 раза, при результирующем сокращении до 37 раз. Содержание органического углерода в отложениях клифа резко увеличивается к конусу выноса и волноприбойной нише, в которой отмечается наличие растительных остатков, вероятнее всего, накопившиеся в результате сползания материала с более молодых, верхних горизонтов разреза вследствие процессов эоловой эрозии и термоабразии [36–38].

Образец, отобранный на а.о. 5,0 м, по многим параметрам характеризуется аномальными значениями параметров (табл. 1, 3, рис. 5–8), что свидетельствует о высокой степени преобразованности его органического вещества. Этот образец обладает низким водородным индексом и тяжелым изотопным составом, что обусловлено потерей в процессе окисления изотопно-лёгких алифатических углеводородных фрагментов в его составе. В составе органического вещества этого образца отсутствуют алкены, тогда как на остальных горизонтах они присутствуют, в том числе в волноприбойной нише. Накопление органического вещества происходило в восстановительных условиях. Отсутствие алкенов, а также минимальное значение параметра C/D, характеризующего вклад низкомолекулярных алканов, по-видимому, свидетельствуют о минимальной бактериальной активности на этом уровне клифа.

Таблица 3. Геохимические коэффициенты, рассчитанные на основе ХМС данных

Table 3. Geochemical ratios based on GC-MS data

№ образца/Sample no.	Pr/Phy	Ki	A/B	C/D	CPI
21,5	1,30	0,50	0,19	0,16	6,94
20	0,78	0,27	0,28	0,07	7,17
15	1,20	0,34	0,18	0,06	9,19
11	1,01	0,47	0,31	0,15	7,55
5	0,38	0,52	0,44	0,03	3,94
ВП1	1,02	0,30	0,34	0,07	6,66
КВ1	1,31	0,36	0,22	0,08	7,18

Примечание: Pr – пристан, Phy – фитан;  $K_i = (Pr + Phy) / (nC_{17} + nC_{18})$ , A/B – отношение суммы площадей пиков n-алканов по четной огибающей к сумме площадей пиков высокомолекулярных n-алканов – маркеров высшей наземной растительности по  $m/z$  57, C/D – отношение суммы площадей пиков низкомолекулярных n-алканов к сумме пиков высокомолекулярных алканов по четной огибающей по  $m/z$  57,  $CPI = 0,5 * [(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})]$ .

Note: Pr – Pristane, Phy – Phytan;  $K_i = (Pr + Phy) / (nC_{17} + nC_{18})$ , A/B – ratio of the sum of n-alkanes peaks areas over the «even envelope» to the sum of high molecular n-alkanes peaks areas – markers of higher terrestrial vegetation ( $m/z$  57), C/D – the ratio of the sum of low-molecular n-alkanes peaks areas to the sum of high-molecular alkanes peaks over an «even envelope» ( $m/z$  57),  $CPI = 0,5 * [(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})]$ .

Проведен корреляционный анализ коэффициентов, полученных по данным пиролиза и ХМС (зависимость коэффициентов Pr/Phy, OI и A/B, HI и  $\delta^{13}\text{C}$ ), и установлена хорошая сопоставимость результатов, полученных разными методами (рис. 6, 7). Как видно из графиков, по мере распределения исследуемых параметров вниз по разрезу происходит преобразование исходного вещества под действием различных биохимических процессов. Так, близкие к исходной биомассе и, следовательно, подвергшиеся наименьшим изменениям образцы расположены на горизонтах, близких к торфяному слою (рис. 8).

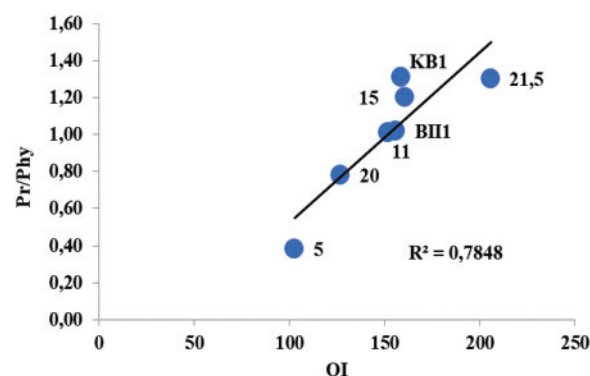


Рис. 6. Линейная зависимость параметров пристан/фитан (Pr/Phy) и кислородного индекса (OI)

Fig. 6. Linear correlation of the Pristan/Phytan (Pr/Phy) ratio and Oxygen Index (OI)

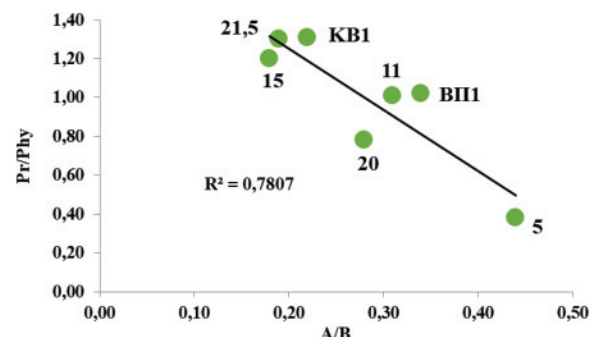


Рис. 7. Взаимосвязь параметров пристан/фитан и A/B

Fig. 7. Correlation of Pr/Phy and A/B ratios

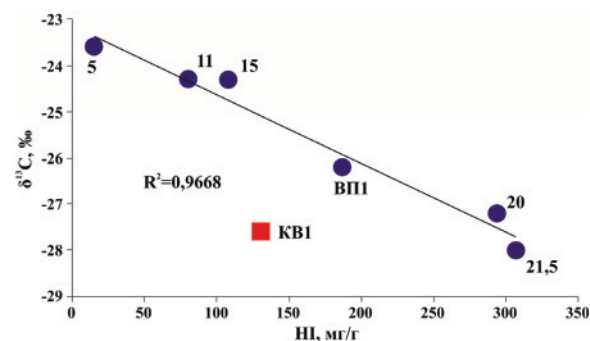


Рис. 8. Зависимость водородного показателя от изотопного состава  $C_{\text{орг}}$  осадков

Fig. 8. Correlation of Hydrogen Index (HI) and A/B ratio

Вследствие обрушения осадочных пород с верхних горизонтов органическое вещество в конусе выноса является смешанным, то есть содержит в себе как глубоко окисленное, так и слабо преобразованное.

Вполне вероятно, что накопление ОВ на уровне 11 м в прошлом происходило в условиях волно-прибойной зоны. При понижении уровня моря имело место интенсивное окисление ОВ осадков, которое привело к потере в его составе насыщенных структурных фрагментов, в результате чего на уровне 5,0 м осталось небольшое количество ОВ, представленного в основном конденсированными структурами (табл. 3, рис. 8).

### Заключение

Графики зависимостей, представленные на рис. 6–8, показывают очень хорошую сопоставимость результатов, полученных разными методами исследования (Rock-Eval, ХМС изотопия углерода), что обусловлено особенностями состава органиче-

ского вещества на молекулярном и изотопном уровнях. В свою очередь, они отражают комплекс биохимических и химических процессов, сопровождающих превращение ОВ на различных стадиях, начиная от раннего диагенеза и заканчивая разрушением ОВ при выходе пород на дневную поверхность.

Полученные результаты позволяют расширить представления об особенностях и закономерностях восточно-арктического литогенеза, выявить закономерности пространственной структуры распределения донных отложений, взвеси и элементно-изотопного состава их органического вещества.

*Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (грант № 14.Z50.31.0012). Наталья Шахова и Олег Дударев благодарят Российский научный фонд (грант № 15-17-200-32-П) за поддержку их вклада в эту работу. Елена Гершелис также благодарна РФФИ за поддержку исследований, проводимых в рамках проекта 18-35-00572 Мол. а. Авторы выражают признательность профессору Гончарову И.В. за ценные советы и практическую помощь, оказанные в процессе аналитических исследований и обсуждении полученных результатов.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата, 2007. – М.: МГЭИК, 2007. URL: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_ru.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf) (дата обращения 02.04.2018).
2. Kattsov V.M., Källén E. Ch. 4: Future climate change: modeling and scenarios // Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). Impacts of a warming arctic. – 2005. – P. 99–150. URL: <https://www.amap.no/documents/download/1085/inline> (дата обращения 02.04.2018).
3. Shakhova N., Semiletov I. Methane Hydrate Feedbacks // Arctic Climate Feedbacks: Global Implications. – USA: WWF International Arctic Programme, 2009. – P. 81–92.
4. Central Arctic Ocean paleoceanography from ~50 ka to present, on the basis of ostracode faunal assemblages from the SWERUS 2014 expedition / L. Gemery, T.M. Cronin, R.K. Poirier, C. Pearce, N. Barrientos, M. O'Regan, C. Johansson, A. Koshurnikov, M. Jakobsson // Climate of the Past. – 2017. – V. 13. – P. 1473–1489.
5. Pore water geochemistry along continental slopes north of the East Siberian Sea: inference of low methane concentrations / C.M. Miller, G.R. Dickens, M. Jakobsson, C. Johansson, A. Koshurnikov, M. O'Regan, F. Muschitiello, C. Stranne, C. Mörtz // Biogeosciences. – 2017. – V. 14. – P. 2929–2953.
6. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Carbon Cycle in the Russian Arctic Seas. – Berlin: Springer, 2004. – 331 p.
7. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, O. Gustafsson, V. Sergienko, L. Lobkovsky, O. Dudarev, T. Tumskey, M. Grigoriev, A. Mazurov, A. Salyuk, R. Ananiev, A. Koshurnikov, D. Kosmach, A. Charkin, N. Dmitrevsky, V. Karnaukh, A. Gunar, A. Meluzov, D. Chernykh // Nature Communications. – 2017. – V. 8. DOI: 10.1038/ncomms15872.
8. Сорохтин Н.О., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. Глубинный цикл углерода и формирование абиогенных углеводородов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 156–173.
9. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, I. Leifer, P. Rekant, A. Salyuk, D. Kosmach // Journal of Geophysical Research. – 2010. – V. 115. – P. 187–193.
10. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, A. Salyuk, V. Joussupov, D. Kosmach, O. Gustafsson // Science. – 2010. – V. 327. – P. 1246–1250.
11. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis / C.J. Sapart, N. Shakhova, I. Semiletov, J. Jansen, S. Szidat, D. Kosmach, O. Dudarev, C. van der Ven, M. Egger, V. Sergienko, A. Salyuk, V. Tumskey, J.-L. Tison, T. Roekmann // Biogeosciences. – 2017. – V. 14. – P. 2283–2292.
12. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change / A.D. McGuire, L.G. Anderson, T.R. Christensen, S. Dallimore, L. Guo, D.J. Haye, M. Heimann, T.D. Lorenson, R.W. Macdonald, N. Roulet // Ecological Monographs. – 2009. – V. 79. – P. 523–555. DOI: 10.1890/08-2025.1.
13. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // Journal of the American Chemical Society. – 1938. – V. 60. – P. 309–319.
14. Problems of arctic shelf research: the experience from integrated geologic and geochemical studies in the Laptev sea / A.S. Ulyantsev, L.I. Lobkovsky, A.V. Zhavoronkov, E.A. Romankevich // Oceanology. – 2015. – V. 55. – № 6. – P. 919–925.
15. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes / T. Tesi, I. Semiletov, G. Hugelius, O. Dudarev, P. Kuhry, O. Gustafsson // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2014. – V. 133. – P. 235–256.
16. Preferential burial of permafrost-derived organic carbon in Siberian – Arctic shelf waters / J.E. Vonk, I.P. Semiletov, O.V. Dudarev, T.I. Eglington, A. Andersson, N. Shakhova, A. Charkin, B. Heim, O. Gustafsson // Journal of Geophysical Research. – 2014. – V. 119. – № 12. – P. 8410–8421.
17. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года / В.И. Сергиенко, Л.И. Лобковский, И.П. Семилетов, О.В. Дударев, Н.Н. Дмитриевский, Н.Е. Шахова, Н.Н. Романовский, Д.А. Космач, Д.Н. Никольский, С.Л. Никифоров, А.С. Саломатин, Р.А. Ананьев, А.Г. Росляков, А.Н. Салюк, В.В. Карнаух, Д.Б. Черных, В.Е. Тумской, В.И. Юсупов, А.В. Куриленко, Е.М. Чувиллин, Б.А. Буханов //

- Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 446. – № 3. – С. 330–335.
18. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Interannual variability of the primary production and organic carbon fluxes in the Arctic seas of Russia // *Oceanology*. – 2008. – V. 48. – № 3. – P. 340–348.
19. Mayer L.M. Surface-area control of organic-carbon accumulation in continental-shelf sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1994. – V. 58. – P. 1271–1284.
20. Ice-shelf damming in the glacial Arctic Ocean: dynamical regimes of a basin-covering kilometre-thick ice shelf / J. Nilsson, M. Jakobsson, C. Borstad, N. Kirchner, G. Björk, R.T. Pierrehumbert, C. Stranne // *The Cryosphere*. – 2017. – V. 11. – P. 1745–1765.
21. Pugach S.P., Pipko I.I. Dynamics of colored dissolved matter on the East Siberian sea shelf // *Doklady Earth Sciences*. – 2013. – V. 448. – № 1. – P. 153–156.
22. Yedoma Ice Complex of the Buor Khaya Pen insula (southern Laptev Sea) / L. Schirmermeister, G. Schwamborn, P.P. Overduin, J. Strauss, M.C. Fuchs, M. Grigoriev, I. Yakshina, J. Rethemeyer, E. Dietze, S. Wetterich // *Biogeosciences*. – 2017. – V. 14. – P. 1261–1283.
23. Sorptive preservation of labile organic-matter in marine sediment / R.G. Keil, D.B. Montlucon, F.G. Prahl, J.I. Hedges // *Nature*. – 1994. – V. 370 (6490). – P. 549–552.
24. Баффингтон Р., Уилсон М. Детекторы для газовой хроматографии / Пер. с нем. – М.: Мир, 1993. – 80 с.
25. Mass-spectra of pentacyclic triterpenoids / K. Shiojima, Y. Arai, K. Masuda, Y. Takase, T. Ageta, H. Ageta // *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. – 1992. – V. 40. – № 7. – P. 1683–1690.
26. NMR-spectra of triterpenoids. II. Hopenes and migrated hopenes / H. Ageta, K. Shiojima, Y. Arai, H. Suzuki, T. Kiyotani // *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. – 1994. – V. 42. – P. 39–44.
27. Dependence of composition of asphaltene-resin-wax deposits on the water cut value / E.V. Kirbizhekova, I.V. Prozorova, N.A. Nebogina, N.V. Yudina, A.A. Grin'ko // *Petroleum Chemistry*. – 2016. – V. 56. – № 8. – P. 765–770.
28. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide. 2<sup>nd</sup> ed. P. I. Biomarkers and Isotopes in the Environmental and Human History. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 387 p.
29. Peters K.E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis // *American Association of Petroleum Geologists*. – 1986. – V. 70. – P. 318–329.
30. Rock-Eval 6 Turbo. User Guide. Vinci Technologies, 2013.
31. К вопросу о погрешностях метода Rock-Eval / П.С. Кашапов, И.В. Гончаров, В.В. Самойленко, Н.В. Обласов, П.В. Трушков // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2015. – № 10. – С. 866–873.
32. Chakhmakhchev A., Sampei Y., Suzuki N. Geochemical characteristics of oils and source rocks in the Yamal Peninsula, West Siberia, Russia // *Organic Geochemistry*. – 1994. – V. 22. – № 2. – P. 311–322.
33. Moore D.M. Reynolds R.C., Jr. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. – Oxford: Oxford University Press, 1997. – 548 p.
34. Шалдыбин М.В. «Глина» в песчанике: происхождение, состав, эволюция (обзор зарубежных работ) // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2015. – № 1. – С. 58–68.
35. Hillier S. Quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by X-ray Powder Diffraction (XRPD) // *International Association of Sedimentologists Special Publication*. – 2003. – V. 34. – P. 213–251.
36. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region / C. Tarnocai, J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, S. Zimov // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2009. – V. 23. – GB2023. DOI: 10.1029/2008GB003327
37. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции / М.Н. Григорьев, С.О. Разумов, В.В. Куницкий, В.Б. Спектор // *Криосфера Земли*. – 2006. – Т. 10. – № 4. – С. 74–94.
38. Чухмахов В.А., Виноградова Т.Л. Геохимические показатели фациально-генетических типов исходного органического вещества // *Геохимия*. – 2003. – Т. 41. – № 5. – С. 497–502.

Поступила 27.10.2018 г.

#### Информация об авторах

**Перевертайло Т.Г.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кажумуханова М.Э.**, геолог, ГИС-специалист ТОО «Казцинк».

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

**Гринько А.А.**, кандидат химических наук, научный сотрудник Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Шахова Н.Е.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Дударев О.В.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук; научный сотрудник Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Гершелис Е.В.**, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

**Семилетов И.П.**, доктор географических наук, член-корреспондент Российской Академии наук, заведующий Лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук; профессор Международной научно-образовательной лаборатории изучения углерода арктических морей Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 552.5(263.53)

## LITHOLOGICAL FEATURES AND ORGANIC MATTER OF SEDIMENTS IN THE SOUTH-EASTERN LAPTEV SEA (MUOSTAKH CAPE)

**Tatyana G. Perevertaylo<sup>1</sup>**,  
ptg@tpu.ru

**Malika Z. Kazhumukhanova<sup>2</sup>**,  
kazhumukhanova@gmail.com

**Natalya V. Nedolivko<sup>1</sup>**,  
nedolivko@tpu.ru

**Andrey A. Grinko<sup>1</sup>**,  
grinko@tpu.ru

**Natalia E. Shakhova<sup>1</sup>**,  
shahova@tpu.ru

**Oleg V. Dudarev<sup>3,1</sup>**,  
dudarev@poi.dvo.ru

**Elena V. Gershelis<sup>1</sup>**,  
elenapanova@tpu.ru

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

**Igor P. Semiletov<sup>3,1</sup>**,  
ipsemiletov@alaska.edu

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

<sup>2</sup> LLP «KazZinc»,  
96, Abaya Street, Kokshetau, 020000, Kazakhstan.

<sup>3</sup> Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences,  
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia.

*The present study seeks to improve current understanding of modern climate changes, which are considered as the consequences of the greenhouse effect caused by increasing content of the main greenhouse gases – carbon dioxide and methane. Complex studies in the land–shelf–atmosphere system across the Arctic shelf, including biogeochemical and lithological analyses of sediments across Eastern Arctic seas, are needed.*

**The research aims** to study both lithological and mineralogical sediment compositions, variability of the organic matter content ( $C_{org}$ ), molecular and isotopic composition of carbon ( $\delta^{13}C$ ) contained in the ice complex deposits (ICD) along the Laptev Sea coast (Cape Muostakh). Samples of modern bottom sediments obtained during the expedition of 2015 in the south-eastern part of the Laptev Sea were investigated.

**Methods** used in the present study include GC-MS analysis, pyrolysis, isotope analysis, X-ray phase analysis followed by further numerical processing and interpretation.

**Results.** The mineralogical composition of the clay fraction has been studied, and the distribution of clay minerals has been established. The features of molecular and isotopic  $C_{org}$  composition are revealed. Initial results on the hydrocarbon source of ICD- $C_{org}$ , which dominates in the shallow part of the East Siberian Arctic shelf, are obtained. Pyrolysis and GC-MS data are highly correlated reflecting complex biogeochemical processes occurring during the  $C_{org}$  transformation at the various stages of lithogenesis. In addition, the study provides preliminary estimates of the light hydrocarbons generation potential for the  $C_{org}$  contained in the sediments.

### Key words:

Organic matter, bottom sediments, isotope analysis, GC-MS, mineralogical composition, Laptev Sea, Cape Muostakh.

*The research was supported by the Government of the RF (grant no. 14.Z50.31.0012). Natalya Shakhova and Oleg Dudarev appreciate the support and contribution of the research of the Russian Science Fund (grant no. 15–17–200–32-II). Elena Gershelis appreciates the support of the research within the project 18–35–00572 Мол. а of the RFBR. The authors express thanks to professor I.V. Goncharov for valuable advice and practical aid in analytical studies and discussion of the results obtained.*

### REFERENCES

1. *Otchet Mezhravitelstvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyam klimata* [Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change]. Moscow, MGEIK 2007. 52 p. Available at: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_ru.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf) (accessed 02 April 2018).
2. Ch. 4: Future climate change: modeling and scenarios. *Arctic Climate Impact Assessment. Impacts of a warming arctic*, 2005, pp. 99–150. Available at: <https://www.amap.no/documents/download/1085/inline> (accessed 02 April 2018).
3. Shakhova N., Semiletov I. Methane Hydrate Feedbacks. *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications*. USA, WWF International Arctic Programme, 2009. pp. 81–92.
4. Gemery L., Cronin T.M., Poirier R.K., Pearce C., Barrientos N., O'Regan M., Johansson C., Koshurnikov A., Jakobsson M. Central Arctic Ocean paleoceanography from ~50 ka to present, on the basis of ostracode faunal assemblages from the SWERUS 2014 expedition. *Climate of the Past*, 2017, vol. 13, pp. 1473–1489.
5. Miller C.M., Dickens G.R., Jakobsson M., Johansson C., Koshurnikov A., O'Regan M., Muschitiello F., Stranne C., Mörth C. Po-

- re water geochemistry along continental slopes north of the East Siberian Sea: inference of low methane concentrations. *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, pp. 2929–2953.
6. Vetrov A.A., Romankevich E.A. *Carbon Cycle in the Russian Arctic Seas*. Berlin, Springer, 2004. 331 p
  7. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey T., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017, vol. 8. DOI: 10.1038/ncomms15872.
  8. Sorokhtin N.O., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. Carbon depth cycle and formation of abiogenic hydrocarbons. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 156–173. In Rus.
  9. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf. *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol. 115, pp. 187–193.
  10. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Joussupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010, vol. 327, pp. 1246–1250.
  11. Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I., Jansen J., Szidat S., Kosmach D., Dudarev O., Van der Veen C., Egger M., Sergienko V., Salyuk A., Tumskey V., Tison J.-L., Roeckmann T. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis. *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, pp. 2283–2292.
  12. McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecological Monographs*, 2009, vol. 79, no. 4, pp. 523–555. DOI: 10.1890/08-2025.1.
  13. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 1938, vol. 60, pp. 309–319.
  14. Ulyantsev A.S., Lobkovsky L.I., Zhavoronkov A.V., Romankevich E.A. Problems of arctic shelf research: the experience from integrated geologic and geochemical studies in the Laptev sea. *Oceanology*, 2015, vol. 55, no. 6, pp. 919–925.
  15. Tesi T., Semiletov I., Hugelius G., Dudarev O., Kuhry P., Gustafsson O. Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 133, pp. 235–256.
  16. Vonk J.E., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Eglington T.I., Anderson A., Shakhova N., Charkin A., Heim B., Gustafsson O. Preferential burial of permafrost-derived organic carbon in Siberian – Arctic shelf waters. *Journal of Geophysical Research*, 2014, vol. 119, no. 12, pp. 8410–8421.
  17. Sergienko V.I., Lobkovskii L.I., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Dmitrievskii N.N., Shakhova N.E., Romanovskii N.N., Kosmach D.A., Nikolskii D.N., Nikiforov S.L., Salomatin A.S., Anan'ev R.A., Roslyakov A.G., Salyuk A.N., Karnaukh V.V., Chernykh D.B., Tumskey V.E., Yusupov V.I., Kurilenko A.V., Chuvin E.M., Buhanov B.A. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of Eastern Arctic seas as a potential cause of the «methane catastrophe»: some results of integrated studies in 2011. *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 1132–1137.
  18. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Interannual variability of the primary production and organic carbon fluxes in the Arctic seas of Russia. *Oceanology*, 2008, vol. 48, no. 3, pp. 340–348.
  19. Mayer L.M. Surface-area control of organic-carbon accumulation in continental-shelf sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, vol. 58, pp. 1271–1284.
  20. Nilsson J., Jakobsson M., Borstad C., Kirchner N., Björk G., Pierehumbert R.T., Stranne C. Ice-shelf damming in the glacial Arctic Ocean: dynamical regimes of a basin-covering kilometre-thick ice shelf. *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, pp. 1745–1765.
  21. Pugach S.P., Pipko I.I. Dynamics of colored dissolved matter on the East Siberian sea shelf. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 448, no. 1, pp. 153–156.
  22. Schirrmeister L., Schwamborn G., Overduin P.P., Strauss J., Fuchs M.C., Grigoriev M., Yakshina I., Rethemeyer J., Dietze E., Wetterich S. Yedoma Ice Complex of the Buor Khaya Peninsula (southern Laptev Sea). *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, pp. 1261–1283.
  23. Keil R.G., Montlucon D.B., Prah F.G., Hedges J.I. Sorptive preservation of labile organic-matter in marine sediment. *Nature*, 1994, vol. 370 (6490), pp. 549–552.
  24. Buffington R., Wilson M. *Detectors for gas chromatography*. Translated from German. Moscow, Mir Publ., 1993. 80 p.
  25. Shiojima K., Arai Y., Masuda K., Takase Y., Ageta T., Ageta H. Mass-spectra of pentacyclic triterpenoids. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 1992, vol. 40, no. 7, pp. 1683–1690.
  26. Ageta H., Shiojima K., Arai Y., Suzuki H., Kiyotani T. NMR-spectra of triterpenoids. 2. Hopenes and migrated hopenes. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 1994, vol. 42, pp. 39–44.
  27. Kirbizhekova E.V., Prozorova I.V., Nebogina N.A., Yudina N.V., Grin'ko A.A. Dependence of composition of asphaltene-resin-wax deposits on the water cut value. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 8, pp. 765–770.
  28. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. *The Biomarker Guide*. 2<sup>nd</sup> ed. P. I. «Biomarkers and Isotopes in the Environmental and Human History». Cambridge, Cambridge University Press Publ., 2005. 387 p.
  29. Peters K.E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *American Association of Petroleum Geologists*, 1986, vol. 70, pp. 318–329.
  30. *Rock-Eval 6 Turbo. User Guide*. Vinci Technologies, 2013.
  31. Kashapov R.S., Goncharov I.V., Samoylenko V.V., Oblasov N.V., Trushkov P.V. Accuracy of ROCK-EVAL method. *International journal of applied and fundamental research*, 2015, no. 10, pp. 866–873. In Rus.
  32. Chakhmakhchev A., Sampei Y., Suzuki N. Geochemical characteristics of oils and source rocks in the Yamal Peninsula, West Siberia, Russia. *Organic Geochemistry*, 1994, vol. 22, no. 2, pp. 311–322.
  33. Moore D.M., Reynolds R.C. Jr. *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford, Oxford University Press Publ., 1997. 548 p.
  34. Shaldybin M.V. «Clay» in sandstone: origin, composition, evolution (review of foreign articles). *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2015, no. 1, pp. 58–69. In Rus.
  35. Hillier S. Quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by X-ray Powder Diffraction (XRPD). *International Association of Sedimentologists Special Publication*, 2003, vol. 34, pp. 213–251.
  36. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, vol. 23, GB2023. DOI: 10.1029/2008GB003327.
  37. Grigoriev M.N., Razumov S.O., Kunitzkiy V.V., Spektor V.B. Dynamics of the Russian East Arctic Sea coast: major factors, regularities and tendencies. *Earth Cryosphere*, 2006, vol. 10, no. 4, pp. 74–94. In Rus.
  38. Chakhmakhchev V.A., Vinogradova T.L. Geokhimicheskie pokazateli fatsialno-gebeticheskikh tipov iskhodnogo organicheskogo veshchestva [Geochemical indicators of facies and genetic types of parent organic matter]. *Geochemistry International*, 2003, vol. 41, no. 5, pp. 497–502.

Received: 27 October 2018.

**Information about the authors**

***Tatyana G. Perevertaylo***, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Malika Z. Kazhumukhanova***, geologist, GIS-specialist, LLP «KazZinc».

***Natalya V. Nedolivko***, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Andrey A. Grinko***, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Natalia E. Shakhova***, Dr. Sc., leading researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Oleg V. Dudarev***, Dr. Sc., leading researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences; researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Elena V. Gershelis***, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Alexey K. Mazurov***, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Igor P. Semiletov***, Dr. Sc., correspondent-member, head of the laboratory, Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректura и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 25.02.2019. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 27,45. Уч.-изд. л. 24,83.  
Заказ 38-19. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ