

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 328, № 4, 2017

# 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)  
Шварцев С.Л., 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)  
Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Кирыянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. 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, 2017

## 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 328, № 4, 2017

**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)  
Shvartsev S.L., 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)  
Korobochkin V.V., 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)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2017

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- 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

- Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности при водопонижении** 6  
Фи Хонг Тхинь, Строкова Л.А.
- Комплексы мшанок (Bryozoa) и кораллов (Rugosa) эмского яруса западной части Алтае-Саянской складчатой области** 18  
Мезенцева О.П., Гумерова Н.В., Удодов Ю.В., Глушков С.Ю.
- Предварительные результаты ревизии минерально-сырьевой базы опал-кристобалитовых пород в Среднем Зауралье** 28  
Смирнов П.В.
- Определение алканов и алкилбензолов в водных образцах методами твердофазной микроэкстракции и газо-жидкостной хроматографией** 38  
Рябов А.Ю., Кудряшов С.В., Очередько А.Н., Великов А.А.
- Натёчные карбонатные новообразования набережной р. Туры: условия формирования, особенности строения и индикационное значение** 46  
Новоселов А.А.
- Прогноз типов геологического разреза на основе фазовременного анализа данных сейсмических наблюдений** 55  
Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Нгуен Суан Хунг, Орлов О.В.
- Качественная трансформация методов оценки эффективности инвестиционных проектов нефтедобычи** 67  
Шевкунов Н.О., Жигунова А.В., Шевкунова А.В.
- Моделирование процесса миграции долгоживущих радионуклидов из графитовых радиоактивных отходов** 75  
Павлюк А.О., Котляревский С.Г., Беспала Е.В., Волкова А.Г., Захарова Е.В., Андриященко Н.Д.
- Анализ подтопленной территории на примере грунтовых вод города Называевска** 85  
Медведков К.С., Штриплинг Л.О.
- Условия формирования пирротина и грейгита в породах Бакчарского месторождения, Западная Сибирь** 94  
Рудмин М.А., Мазуров А.К., Рубан А.С., Усольцев Д.Г.
- Система «вода-гранит»: время формирования состава пресных вод** 108  
Рыженко Б.Н., Сидкина Е.С.
- Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction** 6  
Phi Hong Thin, Strokova L.A.
- Complexes of Bryozoa and Rugose corals of Emsian stage of western Altai-Sayan folded area** 18  
Mesentseva O.P., Gumerova N.V., Udodov Yu.V., Glushkov S.Yu.
- Preliminary results of revision of mineral-raw material base of opal-cristobalite rocks in Middle Trans-Urals** 28  
Smirnov P.V.
- Determination of alkanes and alkylbenzenes in water samples using solid-phase microextraction and following gas-liquid chromatographic analysis** 38  
Ryabov A.Yu., Kudryashov S.V., Ocheredko A.N., Velikov A.A.
- Singer carbonate technogenic mineral formations of the Tyra river embankment: development conditions, structure features and indication potential** 46  
Novoselov A.A.
- Predicting geological section types based on the phase-temporal analysis of seismic observations data** 55  
Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Nguen Xuan Hung, Orlov O.V.
- Qualitative transformation of assessment methods of investment projects efficiency in oil production** 67  
Shevkunov N.O., Zhigunova A.V., Shevkunova A.V.
- Modelling migration process of long-lived radionuclides from graphite radioactive waste** 75  
Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V., Volkova A.G., Zakharova E.V., Andryushchenko N.D.
- Analysis of flooded areas on the example of ground waters in Nazyvaevsk** 85  
Medvedkov K.S., Shtripling L.O.
- Conditions of formation of pyrrhotite and greigite in sediments of Bakchar deposit, Western Siberia** 94  
Rudmin M.A., Mazurov A.K., Ruban A.S., Usoltsev D.G.
- Water-granite system: time of formation of freshwater composition** 108  
Ryzhenko B.N., Sidkina E.S.

УДК 624.131

## ТИПИЗАЦИЯ ГРУНТОВЫХ ТОЛЩ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ХАНОЙ (ВЬЕТНАМ) ПРИ ИЗУЧЕНИИ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВОДОПОНИЖЕНИИ

Фи Хонг Тхинь<sup>1</sup>,  
phthink.tomsk@gmail.com

Строкова Людмила Александровна<sup>2</sup>,  
strokova@sibmail.com

<sup>1</sup> Университет транспорта и коммуникаций,  
3 Кау Чиёу, Тнань Суан, Донгань, г. Ханой, Вьетнам.

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования оседания земной поверхности в городе Ханой (Вьетнам). Город Ханой является одним из крупнейших мегаполисов Азиатского региона с развитой промышленностью, инфраструктурой, высокой плотностью населения. Город расположен на особо сложной природной территории в сейсмически активной зоне. Характерной особенностью геологического строения территории Ханоя является наличие в разрезе мощной толщи слабых грунтов и интенсивное проявление опасных геологических процессов природного и техногенного характера. Одним из наиболее опасных природно-техногенных процессов на территории г. Ханой является оседание поверхности, вызванное интенсивными откачками подземных вод для водоснабжения. Водопотребление в г. Ханое ежегодно увеличивается. Оседание поверхности сопровождается деформациями и разрушениями инженерных сооружений.

**Цель работы:** типизация грунтовых толщ г. Ханой для исследования процесса оседания земной поверхности.

**Методы исследования:** системно-функциональный анализ; теория вероятностей и математическая статистика. В основу работы положены фондовые и литературные материалы. Исследования основаны на фактических материалах геологических, гидро-геологических, инженерно-геологических исследований на территории Ханоя; данных лабораторных исследований грунтов, данных мониторинга за уровнем подземных вод и оседанием поверхности.

**Результаты.** Изучены свойства четвертичных отложений, построены инженерно-геологические разрезы, карты мощности и распространения слабых грунтов. Разработана схема классификации грунтовых толщ и составлена карта типизации грунтовых толщ г. Ханоя. Грунтовые толщ разделены на 4 класса, 6 типов и 9 видов. Указаны типы, которые определяют оседание земной поверхности при водопонижении. Результаты исследования могут быть использованы для прогноза других инженерно-геологических процессов в связи с изменением природных условий и деятельностью человека в Ханое.

### Ключевые слова:

Оседание поверхности, слабые грунты, типизация грунтовых толщ, Ханой.

### Введение

Город Ханой является одним из крупнейших мегаполисов азиатского региона с развитой промышленностью, инфраструктурой, высокой плотностью населения. С 2008 г. площадь административного образования «Ханой» значительно увеличилась и составляет 3344,7 км<sup>2</sup>. В территорию Ханоя входят 10 городских районов, 18 сельских районов и город Шонтай. В настоящее время численность населения города составляет 7 млн человек [1, 2].

Характерной особенностью геологического строения территории г. Ханоя является наличие в разрезе мощной толщи слабых грунтов и интенсивное проявление опасных геологических процессов природного и техногенного характера. Одним из наиболее опасных природно-техногенных процессов на территории г. Ханоя является оседание земной поверхности, вызванное интенсивными откачками подземных вод для водоснабжения.

Оценка, прогноз и районирование оседания земной поверхности имеют большое значение в предупреждении и уменьшении его вреда в отношении гражданских и промышленных сооружений. В мире оседания земной поверхности обычно

наблюдаются в регионах с высокой плотностью населения, особенно в дельтах, сложенных мощными рыхлыми отложениями. После Второй мировой войны в большинстве из этих регионов оседания земной поверхности возросли в связи с увеличением добычи чистой воды, нефти, природного газа. Согласно данным [3, 4] в 1995 г. в более чем 150 регионах в мире наблюдались значительные оседания земной поверхности. В Японии существуют районы, имеющие самые значительные оседания земной поверхности в мире. По данным [5], в Японии в 1977 г. число регионов, в которых проявились оседания земной поверхности из-за добычи подземных вод, составило 40, с общей площадью погружения до 7380 км<sup>2</sup>, в том числе 1200 км<sup>2</sup> ниже, чем средний уровень моря. На втором месте в мире по оседанию земной поверхности из-за добычи подземных вод занимают США. В США оседание земли более 1 м проявляется в четырех штатах: Техасе, Аризоне, Неваде и Калифорнии. В Калифорнии существует самая большая площадь оседания земной поверхности с 16000 км<sup>2</sup>, в Техасе площадь депрессионной воронки составляет 12000 км<sup>2</sup> и штат Аризона – площадь 2700 км<sup>2</sup> [5]. В некоторых местах в мире уро-

вень оседания земной поверхности уже превышает 9 м, например в столице Мехико (Мексика), в пригороде города Лос-Анджелес – Калифорния (США), в долине Сан-Хоакин – Калифорния (США), в зоне реки Рафт – Идахо (США), в зоне Фар Жест Ранд (Южная Африка), в зоне Чешир – Лондон (Великобритания) [3, 5].

Извлечение подземных вод на территории г. Ханоя началось в 1905 г. Но только в 1988 г., то есть 83 года спустя, стали заниматься проблемой оседания земной поверхности. Измерение оседания земной поверхности проводились один раз в год во время сухого сезона с 1988 по 1995 гг. Результаты мониторинга за оседанием земной поверхности в этот период показывают, что почти вся внутренняя площадь города Ханоя (кроме зон вдоль Красной реки) и прилегающие районы подверглись оседанию. Большая скорость оседания земной поверхности (более 10 мм/год) наблюдалась в центральном и южном районах города [6, 7]. Максимальная скорость оседания земной поверхности наблюдалась в микрорайонах Зангво – Тханьконг и Фапван (средняя скорость 20–44 мм/год).

В 1988 г. Инженерно-геологической и гидрогеологической конфедерацией северного региона (в настоящее время известна под названием «Конфедерация планирования и исследования водных ресурсов северного региона») были построены 32 станции мониторинга за оседанием земной поверхности на территории г. Ханоя. Большинство этих станций расположено на юго-западе реки Красной. Эта система мониторинга устроена для наблюдений за оседанием земной поверхности в различных местах с различными инженерно-геологическими условиями и снижениями уровней подземных вод.

Кроме этого, Народный комитет города Ханой заказал Ханойскому институту науки, технологии и строительной экономики построить новую систему мониторинга за оседанием земной поверхности. Эта новая система была спроектирована и построена с 1994 по 2003 г., вначале в микрорайоне Нгокха. В настоящее время эта система состоит из 10 станций. Наблюдение оседания земной поверхности в Ханое проводится регулярно Ханойским институтом науки, технологии и строительной экономики [7].

На станциях, в геологическом разрезе которых присутствуют слои слабых грунтов, скорость оседания земной поверхности сравнительно высокая, например, Тханьконг – 40,46 мм/год, Нгошилиен – 26,52 мм/год, Фапван – 21,02 мм/год; на станциях без слабых грунтов скорость оседания низкая, например, Нгокха – 1,73 мм/год, Майзич – 2,81 мм/год, Донгань – 4,66 мм/год; на станциях, расположенных около реки Красной скорость оседания ниже в результате пополнения подземных вод речной водой, например, Лыонгиен – 15,94 мм/год, Залам – 19,13 мм/год [8].

В настоящее время установлена связь между оседанием земной поверхности и извлечением под-

земных вод на территории г. Ханоя. Многочисленные разрушения жилых домов и зданий в г. Ханое произошли в период с 1985 по 1995 гг., в период интенсификации добычи подземных вод, что является убедительным доказательством наличия связи между оседанием земной поверхности и процессом добычи подземных вод на территории г. Ханоя.

Результаты мониторинга за оседанием земной поверхности показали, что почти вся внутренняя площадь города Ханоя подверглась оседанию с разными скоростями, зависящими от инженерно-геологических условий и характеристик снижения уровня подземных вод. В микрорайонах со слоями слабых грунтов в разрезе и сильными снижениями уровней подземных вод величина оседания земной поверхности высокая, например: Тханьконг, Фапван, Нгошилиен, Тьонгмай, Хадинь, Лыонгиен.

Вопросам оседания поверхности на территории г. Ханоя, связанного с интенсивным извлечением подземных вод, посвящены исследования Ф.Х. Жао, Ч.М. Тху, Ч.М. Льеу, Н.Х. Фюнг, Л.Ч. Тхань, Ч.В. Ты и других [6–15]. Однако эти исследования не носят всесторонний и систематический характер и сосредоточены только в районах Старого Ханоя.

Критический анализ фондовых материалов, выполненный авторами, показал: отсутствие сводной таблицы нормативных значений инженерно-геологических свойств территории в пределах Нового Ханоя (с 2008 г.); отсутствие карт распространения и мощности слабых грунтов; отсутствие карты распространения грунтовых толщ, определяющих процесс оседания. Исследования авторов отражены в работах [16–17].

Дальнейшие исследования оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод потребовали выполнить типизацию грунтовых толщ территории г. Нового Ханоя. Для достижения поставленных задач необходимо выполнить следующие работы: описать физико-механические свойства четвертичных отложений; определить мощность и распространение слабых грунтов; типизировать грунтовые толщ на классы, типы и виды; составить карту типизации грунтовых толщ территории г. Ханоя.

#### Характеристика объекта и методики исследований

Большая часть территории г. Ханоя находится на равнине Бакбо, которая имеет наклон с северо-запада на юго-восток (по течению Красной реки). На севере средние отметки поверхности составляют 8...12 м над уровнем моря, в центре 5...7 м, на юго-востоке 3...4 м [1, 2]. Невысокие горы охватывают  $\frac{1}{4}$  территории города.

Город Ханой, как вся равнина Бакбо, расположен в области субэкваториального муссонного климата. Максимальное количество дождей выпадает в летние и осенние месяцы (с мая по октябрь, примерно 80 % годовой нормы осадков), в зимние месяцы (с декабря по март следующего года) количество дождей минимальное [1, 2].

В тектоническом отношении Вьетнам расположен на стыке Тихоокеанского и Средиземноморского геосинклинальных поясов. Северная часть Вьетнама связана со следующими крупными регионально-тектоническими единицами – Катазиатской каледонской геосинклинальной складчатой системой, подвижной частью Южно-Китайской платформы, Восточно-Индокитайской (Северо-Вьетнамской) складчатой системой. По особенностям геологического строения территорию подразделяется на 2 области.

- Северо-восточный Бакбо относится к подвижной окраине Южно-Китайской платформы и юго-западному окончанию Катазиатской системы. Образование древнего фундамента платформы (гнейсы, кварцы, кристаллические сланцы, мраморы, гранитоиды) перекрыты верхнепротерозойскими и палеозойскими терригенно-карбонатными отложениями. Вдоль северо-восточного побережья залива Бакбо (юго-запад Катазиатской системы) терригенно-эффузивные отложения кембрия, ордовика и силура сильно смяты с образованием складчатого комплекса нижнего палеозоя. Мезозойские вулканогенно-осадочные и терригенные толщи выполняют отдельные прогибы и впадины. Позднепалеозойские и мезозойские интрузии кислого и основного состава связаны с разломами.
- Северо-западный Бакбо – раннегерцинская и индосинийская (позднетриасовая) геосинклинально-складчатая система. Северо-западный Бакбо характеризуется особыми пермо-триасовыми офиолитовыми образованиями, превращенными в глыбово-складчатую зону Индосинийского комплекса.

К настоящему времени на территории города с XIII в. до 2002 г. зафиксировано 152 землетрясения (144 – в XX в.), в том числе два сильных землетрясения около 7–8 баллов (1278 и 1285 гг.), три – 7, тридцать два – 6, и остальные – менее 6 баллов [19].

Большая часть территории Ханоя расположена в центральной погруженной зоне прогиба реки Красной, приуроченного к чрезвычайно сложному тектоническому узлу – сгущению тектонических разломов различного порядка и простирания, в основном северо-западного, северо-восточного и субширотного, реже субмеридионального направлений. Прогиб ограничен глубинными разломами с горными сооружениями на северо-восточном и юго-западном краях, а в юго-восточном направлении он продолжает развиваться в заливе Бакбо. Кроме глубинных разломов, на территории прогиба очень широко и активно развиваются многочисленные региональные, локальные разрывы и другие структуры – структуры поднятия и структуры опускания, которые обычно отчетливо наблюдаются в зонах правой сдвиговой дислокации, протягивающейся в северо-западном направлении. Особенно четко выражены разрывы низкого порядка в

узловых пересечениях глубинных разломов. Некоторые разломы относятся к числу активных, перемещения отдельных крупных тектонических блоков составляют от долей до 5 мм, реже 8 мм в год [1, 18–23]. Согласно картам обзорного сейсмического районирования территории Вьетнама, а также детального сейсмического районирования Ханойского прогиба и его окрестностей, сейсмичность территории Ханоя соответствует 7 и 8 баллам шкалы MSK-64 [19].

Инженерно-геологические особенности четвертичных отложений на территории г. Ханоя определены по результатам инженерно-геологических изысканий многих проектов по строительству мостов, дорог, многоэтажных зданий и гидрогеологических изысканий на территории г. Ханоя, собранных Фи Х.Т. от коллег и собственного участия в инженерно-геологических изысканиях на территории г. Ханоя. Для описания грунтов использованы данные 691 скважины глубиной от 11 до 281 м (до неогенных отложений), результаты лабораторных испытаний по 4536 образцам грунтов. Мощность и распространение четвертичных отложений на территории показаны на двух инженерно-геологических разрезах (рис. 1, 2), составленных Фи Х.Т. в 2013 г.

В разрезе четвертичных отложений выделяют пять свит, различающихся по возрасту и генезису, гранулометрическим составом – от галечников до тяжелых глин: раннеплейстоценовую свиту *Лэчи (allc)* мощностью 2,5–4,5 м, глубиной залегания 45,0–80,0 м, сложенную аллювиальными грунтами, представленными гальками, гравием, линзами песков, супесей или суглинков; средне-позднеплейстоценовую свиту *Ханой (a, apII–III<sup>h</sup>hn)* мощностью 2,5–34,0 м, сложенную аллювиальными и аллювиально-пролювиальными грунтами, представленными гальками, гравием и песками, местами суглинками и супесями, развитыми в верхней части разреза; позднеплейстоценовую свиту *Виньфук (a, alb, amIII<sup>2</sup>vp<sub>1,2,3</sub>)* мощностью 6,2–38,0 м, представленную аллювиальными, аллювиально-озерно-болотными и аллювиально-морскими отложениями – песками в нижней части разреза и суглинками и глинами в верхней (местами также прослеживаются суглинки с органическими остатками); ранне-среднеголоценовую свиту *Хайхынг (lb, m, ambIV<sup>1-2</sup>hh<sub>1,2,3</sub>)* мощностью 1,0–43,0 м, состоящую из озерно-болотных, морских и аллювиально-болотно-морских отложений, относящихся к специфическим слабым водонасыщенным грунтам и представленным суглинками и глинами с органическими остатками в основании разреза, постепенно сменяющимися морскими глинами синего цвета; позднеголоценовую свиту *Тхайбинь (a, albIV<sup>3</sup>tb<sub>1,2</sub>)* мощностью 0,5–26,5 м, представленную аллювиальными и аллювиально-озерно-болотными отложениями, имеющими широкое распространение и характеризующимися постепенным переходом от песков к супесям и суглинкам, местами с включениями органических остатков.



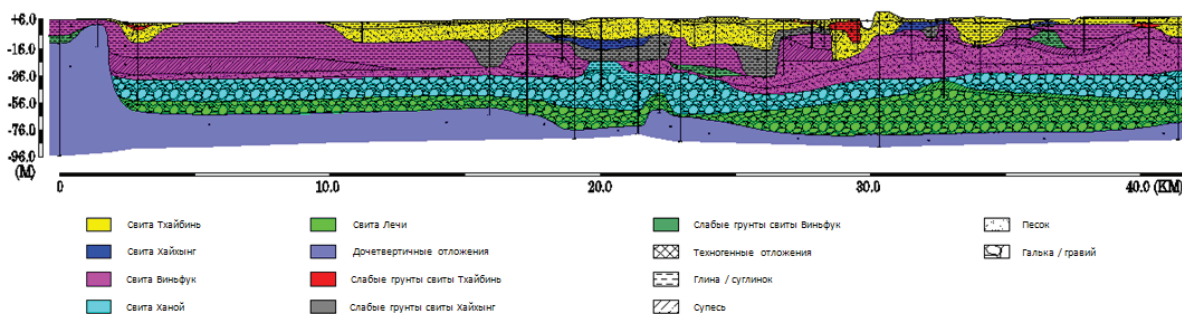


Рис. 1. Распределение слабых грунтов на территории г. Ханоя в инженерно-геологическом разрезе AA', составленном Фи Х.Т. в 2013 г.

Fig. 1. Distribution of soft soil layers (in black color) in geotechnical cross-section AA' in the Hanoi area, made by Phi H.T. in June 2013. The greatest depth is 100 m; the section length is 41,3 km

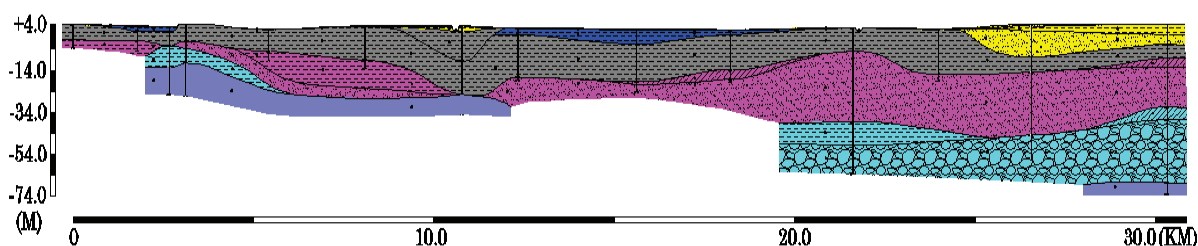


Рис. 2. Распределение слабых грунтов на территории г. Ханоя в инженерно-геологическом разрезе BB', составленном Фи Х.Т. в 2013 г. Условные обозначения – на рис. 1

Fig. 2. Distribution of soft soil layers (in black color) in geotechnical cross-section BB' in the Hanoi area, made by Phi H.T. in June 2013.

По возрасту, генезису и физико-механическим свойствам четвертичные отложения территории разделены на 24 слоя (сверху вниз):

**I. Техногенные отложения (tH)**

Слой 1: Насыпные и намывные грунты – пески, суглинки и супеси с примесью отходов.

**II. Верхняя пачка свиты Тхайбинь ( $aIV^3tb_2$ )**

Слой 2: Суглинистый ил в дне озер и прудов.  
 Слой 3: Суглинок, перемежающийся с супесями, коричневый, розовато-коричневый, мягкопластичный.  
 Слой 4: Мелко- и тонкозернистый водонасыщенный песок, местами с гравием, буровато-серый, рыхлый.

**III. Нижняя пачка свиты Тхайбинь ( $alb, aIV^3tb_1$ )**

Слой 5: Глина, желтовато-серая, тугопластичная-мягкопластичная.  
 Слой 6: Суглинок, желтовато-серый, коричневый, тугопластичный-мягкопластичный.  
 Слой 7: Водонасыщенный суглинок с органическими остатками, серо-коричневый, текучепластичный-текучий.  
 Слой 8: Суглинок, перемежающийся с супесями и песками, серо-коричневый, мягкопластичный.  
 Слой 9: Мелко- и тонкозернистые водонасыщенные пески, зеленовато-серые, средней плотности.

**IV. Верхняя пачка свиты Хайхынг ( $ambIV^{1-2}hh_3$ )**

Слой 10: Суглинок, перемежающийся с супесями и песками, местами серо-коричневый, мягкопластичный.

**IV. Верхняя пачка свиты Хайхынг ( $ambIV^{1-2}hh_3$ )**

Слой 11: Водонасыщенный суглинок с органи-

ческими остатками, темно-серый, текучепластичный-текучий.

**V. Средняя пачка свиты Хайхынг ( $mIV^{1-2}hh_2$ )**

Слой 12: Глина, синяя, тугопластичная-мягкопластичная.

**VI. Нижняя пачка свиты Хайхынг ( $lbIV^{1-2}hh_1$ )**

Слой 13: Суглинистый ил с органическими остатками, темно-серый.

**VII. Верхняя пачка свиты Виньфук ( $a, amIII^2vp_3$ )**

Слой 14: Глина, светло-серая, желтовато-серая, тугопластичная.

Слой 15: Суглинок, разноцветный (коричневый, желтый, красный), полутвердый- тугопластичный.

**VIII. Средняя пачка свиты Виньфук ( $albII^2vp_2$ )**

Слой 16: Суглинок с органическими остатками, темно-серый, текучепластичный-текучий.

**IX. Нижняя пачка свиты Виньфук ( $aIII^2vp_1$ )**

Слой 17: Супесь, перемежающаяся с суглинками или песками, желтовато-серая, пластичная.  
 Слой 18: Мелко- и тонкозернистые водонасыщенные пески, коричневые, желтовато-коричневые, средней плотности-плотные.

Слой 19: Средне- и крупнозернистые водонасыщенные пески, местами с гравием и галькой, желтовато-серые, светло-серые, плотные и очень плотные.

**X. Свита Ханой ( $ap, aII-III^4hn$ )**

Слой 20: Суглинок, местами с органическими остатками, серо-коричневый, мягкопластичный.

Слой 21: Супесь, местами с гравием, серая, пластичная.

Слой 22: Водонасыщенные галечно-гравийные отложения, местами крупнозернистые пески, серые, желтовато-серые, очень плотные.

**XI. Свита Лечи (aIIc)**

Слой 23: Супесь, местами с гравием, серая, ко-ричная, пластичная.

Слой 24: Водонасыщенные галечно-гравийные отложения, мелко- и крупнозернистые с су-глинками, коричневатого-серые, желтовато-се-рые, очень плотные.

Физико-механические свойства четвертичных отложений на территории г. Ханоя представлены в табл. 1.

В верхней части разреза четвертичных отложе-ний прослеживаются аллювиально-озерно-болот-ные отложения свиты Виньфук (*albIII<sup>2</sup>vp<sub>2</sub>*) – слой 16, озерно-болотные и аллювиально-морские-бо-лотные отложения свиты Хайхынг (*lb, am-bIV<sup>1-2</sup>hh<sub>1,3</sub>*) – слои 13 и 11, и аллювиально-озерно-болотные отложения свиты Тхайбинь (*albIV<sup>3</sup>tb<sub>1</sub>*) – слои 2 и 7 – слабые песчано-глинистые грунты с низкой несущей способностью и высокой сжимае-мостью ( $R_0 < 100$  кПа и  $E_{0(1-2)} < 5$  МПа). Широкое рас-пространение водонасыщенных песчано-глини-стых отложений с включением органики свиты Хайхынг (*lbIV<sup>1-2</sup>hh<sub>1</sub>*) – слой 13 – определяет высо-кую степень сложности инженерно-геологических

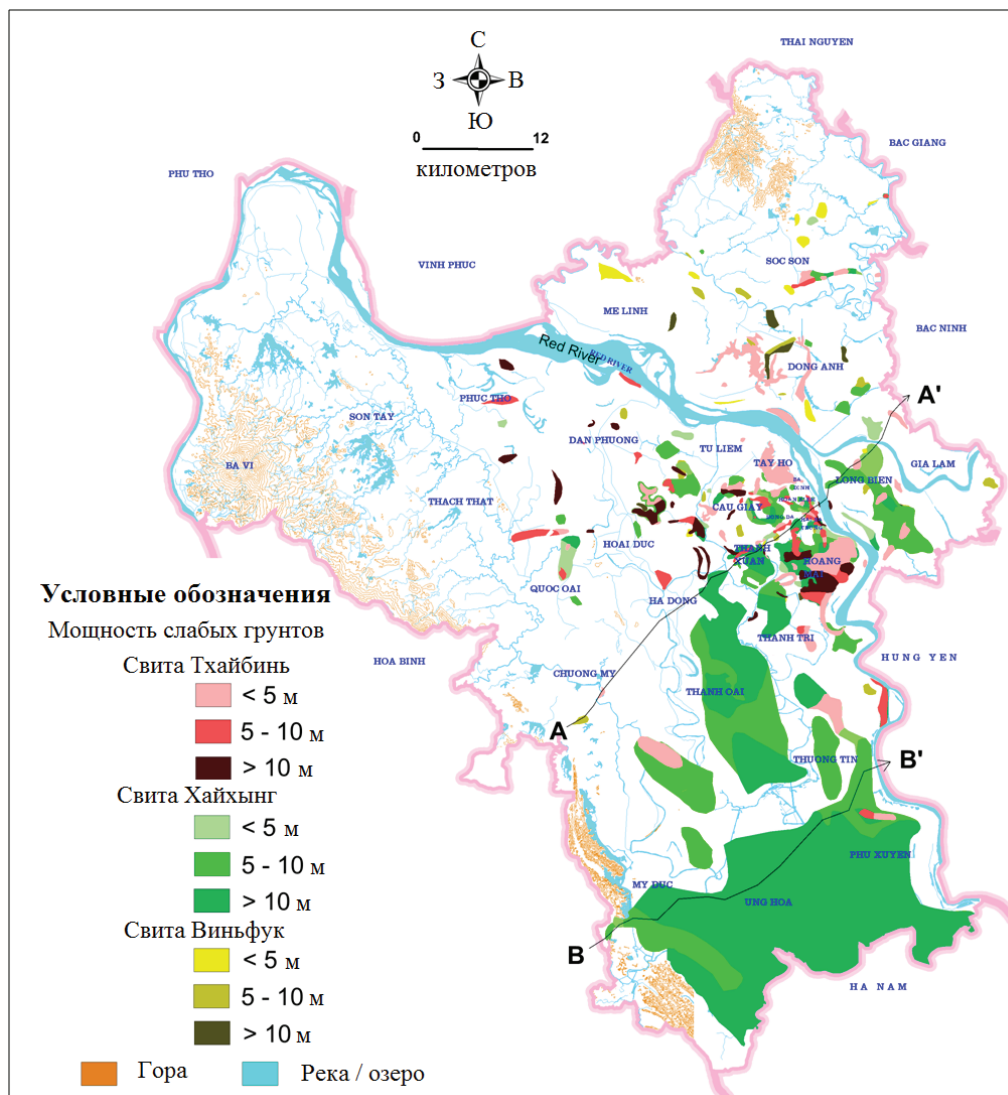
условий рассматриваемой территории. Присут-ствие органического вещества с различной степе-нью разложения в слабых грунтах *lbIV<sup>1-2</sup>hh<sub>1</sub>* созда-ет пространственную неоднородность и анизотро-пию строения, состояния и свойств грунтов. Толща слабых пород свиты Хайхынг имеет наиболее ши-рокое распространение в центральной части и юж-ных районах города. На основе собранных данных составлена карта мощности и распространения слабых водонасыщенных грунтов территории г. Ханоя (рис. 3). Мощность толщи слабых пород свиты Хайхынг *lbIV<sup>1-2</sup>hh<sub>1</sub>* изменяется в широких пределах от 0,5 до 43,0 м. Она встречается в глуби-не от 0,3...15,5 м в южных районах города до 3,0...37,5 м в центральной части. Слабые грунты свиты Хайхынг *lbIV<sup>1-2</sup>hh<sub>1</sub>* характеризуются самы-ми низкими параметрами прочности ( $\varphi = 5^{\circ}39'$  и  $c = 9,1$  кПа) и самой высокой сжимаемостью ( $E_{0(1-2)} = 1,6$  МПа) (табл. 1).

В пределах глубины градостроительного осво-ения Ханоя зафиксировано наличие двух водонос-ных комплексов. Повсеместное распространение в городе имеет плейстоценовый слабораспорный во-доносный комплекс (qr), водовмещающими поро-дами которого являются крупнообломочные обра-зования (галька и гравий) и пески (aIIc, ar, aII-III<sup>1</sup>hn и aIII<sup>2</sup>vp<sub>1</sub>). Коэффициент водопроницаемо-

**Таблица 1.** Обобщенные показатели состава и свойств четвертичных отложений территории Ханоя по данным Х.Т. Фи, получен-ным в 2013 г.

**Table 1.** Summary of physical and mechanical properties of quaternary sediments in the Hanoi area according to the study results of Phi H. T. in 2013 [16]

№ слоя Layer No.	Природная влаж- ность Natural moisture con- tent W, %	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup> Bulk density $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Число пластичности $I_p$ , % Plasticity index $I_p$ , %	Показатель текучести $I_L$ , отн. ед. Liquidity index $I_L$	Угол внутреннего трения грунта $\varphi$ , град. Internal friction angle $\varphi$ , degree	Удельное сцепление $c$ , кгс/см <sup>2</sup> Cohesion $c$ , kPa	Модуль деформации $E_0$ , МПа Deformation modulus $E_0$ , MPa	Несущая способность $R_0$ , кгс/см <sup>2</sup> Bearing capacity $R_0$ , кПа	Содержание органи- ческих веществ O, % Percentage of organic matters O, %	Количество образцов Number of tested samples
2	55,8	1,64	16,9	1,12	5	0,071	1,6	0,5	-	52
3	32,6	1,79	15,6	0,58	10	0,165	6,9	1,2	-	29
4	-	-	-	-	25	-	7,2	1,0	-	16
5	32,8	1,85	19,0	0,35	10	0,293	11,1	1,7	-	87
6	29,1	1,89	14,3	0,37	12	0,268	11,6	1,7	-	733
7	42,6	1,72	14,8	0,89	7	0,120	4,0	0,7	5,7	385
8	31,2	1,82	9,7	0,74	12	0,147	7,6	1,1	-	249
9	-	-	-	-	27	-	10,7	1,3	-	545
10	34,3	1,74	12,1	0,73	10	0,161	5,4	1,1	-	89
11	40,1	1,76	15,6	0,96	6	0,096	3,4	0,6	12,2	27
12	35,1	1,80	18,6	0,47	10	0,242	8,9	1,4	5,3	163
13	53,3	1,61	15,9	1,26	5	0,091	1,6	0,5	9,7	628
14	30,6	1,87	18,5	0,25	12	0,308	15,2	1,8	-	196
15	26,6	1,92	13,9	0,28	14	0,304	14,8	2,1	-	608
16	36,4	1,76	12,8	0,88	10	0,120	4,9	0,9	8,0	54
17	26,0	1,85	7,5	0,77	15	0,145	11,5	1,4	-	167
18	-	-	-	-	33	-	19,8	2,9	-	195
19	-	-	-	-	36	-	30,1	3,7	-	215
20	27,3	1,84	10,8	0,59	9	0,182	7,0	1,2	-	08
21	-	-	-	-	-	-	12,4	1,8	-	10
22	-	-	-	-	-	-	>50,0	>5,0	-	80
23	-	-	-	-	-	-	15,0–20,0	>2,0	-	-
24	-	-	-	-	-	-	>50,0	>5,0	-	-



**Рис. 3.** Карта мощности и распространения слабых водонасыщенных грунтов территории г. Ханоя, составленная Фи Х.Т. в 2013 г.

**Fig. 3.** Distribution of soft soil layers in the Hanoi area, made by Phi H.T. in June, 2013

сти горизонта составляет от 50 до 2300 м<sup>2</sup>/сут, коэффициент фильтрации грунтов горизонта – от 20 до 68 м/сут [1, 2, 6–13]. Крупнообломочные грунты и пески свит Ханой и Виньфук рассматриваются как важный несущий горизонт для свайных фундаментов в Ханое.

В верхней части разреза современных аллювиальных отложений (aIV<sup>3</sup>tb<sub>1,2</sub>), представленных водонасыщенными песками, местами с гравием, прослеживается голоценовый водоносный комплекс (qh). Коэффициент водопроницаемости изменяется от 20 до 790 м<sup>2</sup>/сут, чаще – 200...400 м<sup>2</sup>/сут. Положение статического уровня водоносного горизонта зависит от интенсивности атмосферных осадков и уровня воды в р. Красной и изменяется в пределах 1...5 м в течение года [1, 2, 6–8, 16].

Водонасыщенные песчано-глинистые породы рассматриваются как среда развития пльвунов,

суффозионных процессов, тиксотропных явлений в глинистых грунтах, склоновых процессов (оползни, оплывания) на незакрепленных берегах рек и котлованов, именно их присутствие в разрезе является причиной значительных осадок земной поверхности при откачках подземных вод.

#### Результаты исследований

Мониторинг за оседанием поверхности и снижением уровня грунтовых вод проводится Ханойским институтом строительных технологий (НИВТ) по 10 наземным станциям [8]. По данным мониторинга, максимальные величины оседаний поверхности существенно различаются в отдельных районах города. Так, например, на участках Хадинь – 147,7 мм (1997–2004 гг.), Фаван – 221,7 мм (1996–2005 гг.) и Тханьконг – 372,8 мм (1996–2004 гг.), что соответствует величине водо-

понижения до 5,3 м (1998–2008 гг., Хадинь), до 4,7 м (1996–2008 гг., Фапван) и до 10,7 м (1997–2008 гг., Тханьконг) [8, 18].

Согласно результатам исследования Ч.В. Ты, в 2009 г. оседание поверхности из-за нагрузки от системы двух- и пятиэтажных зданий на плитных фундаментах по линии инженерно-геологического разреза длиной 4 км в районе Хадонг составляет 15–35 см.

Результаты исследования связи между оседанием земной поверхности и мощностью насыпных отложений, выполненные Фи Х.Т. (2014), показали, что оседание поверхности из-за нагрузки от насыпных грунтов с мощностью 2,0 м составляет 6 см; с мощностью 5,5 м – 11 см; с мощностью 10,0 м – 26 см.

Таким образом, интенсивность оседания земной поверхности зависит, прежде всего, от объемов добычи подземных вод, состава, мощности и физико-механических свойств грунтов и в меньшей степени от нагрузки от зданий и сооружений, наличия и мощности насыпных грунтов. Максимальные оседания наблюдаются в районах развития мощных толщ малолитифицированных сжимаемых озерно-болотных отложений свиты Хайхынг ( $lbIV^{1-2}hh_1$ ) [6, 7]. Так, например, мощность слабых грунтов  $lbIV^{1-2}hh_1$  варьирует от 22 м на участке Хадинь до 26 м (Фапван) и 16 м (Тханьконг) [4, 9].

Для предварительной оценки и анализа оседания поверхности на станциях Тханьконг и Хадинь была использована программа TZR, разработанная Фам Х.Ж., при сочетании применения двухмерной модели движения подземных вод и одномерной модели консолидации на базе метода конечных элементов. Выполненное моделирование показало, что 86–96 % от общей величины осадки составляет сжатие слабых грунтов свиты Хайхынг  $lbIV^{1-2}hh_1$  [16].

Грунтовые толщ могут состоять из множества различных грунтовых слоев и скальных пород, расположенных по определенным правилам. Толщ могут разделяться на классы, типы и виды на основе условий их залегания, состава, физико-механических свойств, мощности, в зависимости от целей конкретной типизации [24]. Обычно разные типы грунтовых толщ отражают их поведение при воздействии инженерных сооружений или изменения геологической среды [25–30].

Таким образом, типизация грунтовых толщ является системой пространственного расположения грунтовых слоев, выделенных согласно цели районирования.

Результаты оценки и анализа оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод на территории г. Ханоя показали, что величина оседания земной поверхности в большей степени зависит от мощности слабых грунтов. Поэтому мощность слабых грунтов является первым показателем, используемым при типизации грунтовых толщ.

В связи с исследованием оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод глубина исследований должна достигать водонасыщенные гравийно-галечниковые отложения свиты Ханой (слой 22). Это главный водоносный горизонт, широко используемый для водоснабжения. Данный слой менее подвержен влиянию изменений окружающей среды. Ниже этой глубины воздействие извлечения подземных вод на величину оседания земной поверхности незначительное.

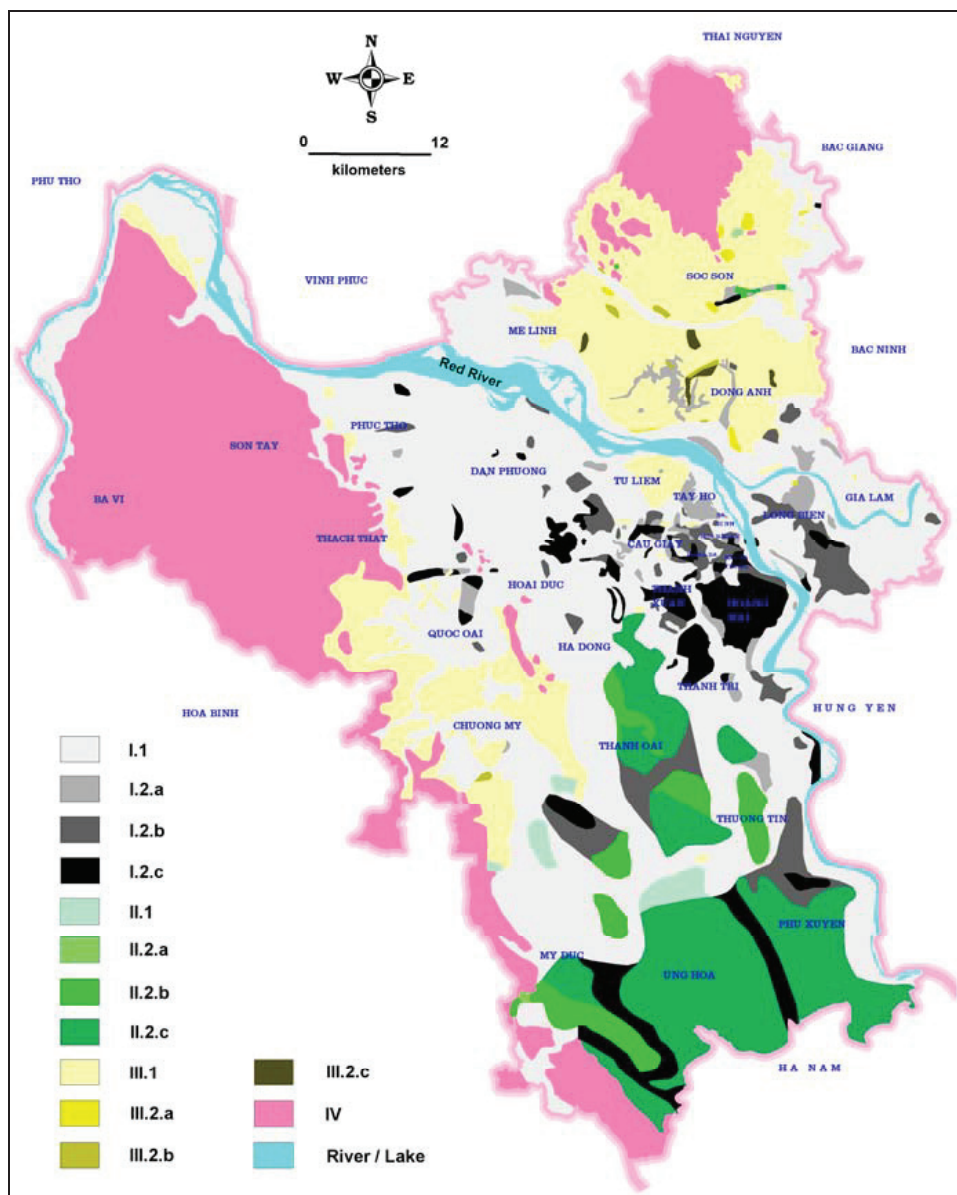
Исследуемые грунтовые толщ были разделены на классы, типы и виды. Классы выделялись по условиям залегания свит и обозначались римскими цифрами (I, II, III и т. д.). Типы (1 или 2) определялись на основе наличия или отсутствия слабых грунтов и обозначались арабскими цифрами

**Таблица 2.** Обозначения и принципы выделения классов, типов и видов грунтовых толщ на территории города Ханой

**Table 2.** Symbols and principles of selection of classes, types and kinds of soil strata in the city of Hanoi

Класс/Class		Тип/Type		Вид/Kind	
Обозначение Sign	Отложения, распространенные на земной поверхности Deposits on the Earth's surface	Обозначение Sign	Слабые грунты Soft soils	Обозначение Sign	Мощность слабых грунтов, м Thickness of soft soils, m
I	Свита Тхайбинь Thai Binh formation	I.1	Отсутствуют/Absent	–	–
		I.2	Присутствуют Present	I.2.a	<5
				I.2.c	>10
II	Свита Хайхынг Hai Hung formation	II.1	Отсутствуют/Absent	–	–
		II.2	Присутствуют Present	II.2.a	<5
				II.2.c	>10
III	Свита Виньфук Vinh Phuc formation	III.1	Отсутствуют/Absent	–	–
		III.2	Присутствуют Present	III.2.a	<5
				III.2.c	>10
IV	Дочетвертичные отложения Pre-quaternary sediments	–	–	–	–





**Рис. 4.** Карта типизации грунтовых толщ территории г. Ханоя в связи с исследованием оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод

**Fig. 4.** Map of soil type distribution for Hanoi in the study of land subsidence due to groundwater extraction

после номеров классов (I.1, I.2, II.1, II.2 и т. д.). Виды выделялись по мощности слабых грунтов и обозначались латинскими буквами после номеров классов и типов (I.2.a, I.2.b, I.2.c, II.2.a, II.2.b, II.2.c и т. д.). С использованием этих принципов грунтовые толщ территории Ханоя были разделены на 4 класса, 6 типов и 9 видов (табл. 2).

Х.Т. Фи в 2013 г. была составлена карта типизации грунтовых толщ Ханоя в масштабе 1:50 000 (рис. 4) на основе геологической карты территории города того же масштаба, построенной К.Т. Нго и опубликованной Ханойским издательством в 2011 г., и стратиграфических данных по 691 скважине.

Результаты типизации грунтовых толщ изучаемой территории показали, что типы слабых грун-

тов широко распространены в центральной части и южных районах города, где оседание земной поверхности более значительно при большем водопадении.

#### Выводы

1. В верхней части разреза четвертичных отложений территории г. Ханоя существует пять слоев слабых песчано-глинистых грунтов. В том числе толща слабых грунтов свиты Хайхынг ( $lbIV^{1-2}hh_1$ ) имеет большую мощность, широкое распространение и высокую сжимаемость ( $E_{0(1-2)}=16$  кгс/см<sup>2</sup>) и определяет высокую степень сложности инженерно-геологических условий рассматриваемой территории.

2. Результаты оценки и анализа оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод на территории г. Ханоя показали, что величина оседания земной поверхности в большей степени зависит от мощности слабых грунтов.
3. В связи с исследованием оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод грунтовые толщ территории г. Ханоя типизированы на 4 класса, 6 типов и 9 видов. В том числе типы I.2.b, I.2.c, II.2.b и II.2.c с мощностью слабых грунтов больше 5 м и широ-

ким распространением определяют значительную величину оседания земной поверхности при водопонижении и необходимость особого внимания при исследовании оседания земной поверхности.

4. Результаты исследования могут быть использованы для прогноза других инженерно-геологических процессов в связи с изменением природных условий и деятельности человека.

*Работа поддержана Вьетнамским государственным фондом по образованию и профессиональной подготовке (код проекта: ДТДЛ.2012-Т/28).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Report on water resources in Hanoi, Vietnam (for the Center for Water Resources Planning and Investigation (CWRPI)). – Hanoi, Vietnam: CWRPI, 2011. – 187 p. (in Vietnamese)
2. Vu V.P. Geology, geomorphology and natural resources of Hanoi, Vietnam. – Hanoi, Vietnam: Hanoi Publisher, 2011. – 280 p. (in Vietnamese)
3. Land subsidence / Barends F.B.J., Brouwer F.J.J., F.H. Schroder // Proceedings of the fifth international symposium on land subsidence. – London: IAHS Press, 1995. – 92 p.
4. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China / R.L. Hu, Z.Q. Yue, L.C. Wang, S.J. Wang // Engineering Geology. – 2004. – № 76. – P. 65–77.
5. Joseph F.P. Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal. – Michigan: Book Crafters, 1984. – 340 p.
6. Nguyen H.P. Report on research and prediction of land subsidence due to changes in engineering geological and hydrogeological conditions in Thanh Tri District. – Hanoi, Vietnam: Hanoi University of Mining and Geology, 2004. – 230 p. (in Vietnamese)
7. Nguyen H.P. Report on collecting and verifying data, additional studies for mapping of soft soils distribution in Hanoi to plan for construction in the Capital of Vietnam. – Hanoi, Vietnam: Hanoi University of Mining and Geology, 2004. – 261 p. (in Vietnamese)
8. Report on research program on Hanoi land subsidence due to changing of groundwater level (for the Hanoi Institute of Building Technology (HIBT)). – Hanoi, Vietnam: HIBT, 2004. – 125 p. (in Vietnamese)
9. Giao P.H., Ovaskainen E. Preliminary assessment of Hanoi land subsidence with reference to groundwater development // Lowland Technology International. – 2000. – № 2 (2). – P. 17–29.
10. Hanoi Institute of Building Technology (HIBT). Report on Research Program on Hanoi Land Subsidence due to Changing of Groundwater Level. – Hanoi: HIBT, 2004. – № 38. – P. 41–70. (in Vietnamese).
11. Phuong N.H. Report on Research and Prediction of Land Subsidence due to Changes in Engineering Geological and Hydrogeological Conditions in Thanh Tri District, Hanoi, Vietnam. – Hanoi: Hanoi University of Mining and Geology, 2004. – P. 150–154. (in Vietnamese).
12. Phuong N.H. Report on Collecting and Verifying Data, Additional Studies for Mapping of Soft Soils Distribution in Hanoi to Plan for Construction in the Capital of Vietnam. – Hanoi: Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam, 2004. – P. 101–163. (in Vietnamese).
13. Thang L.T. Research on Classification of Soft Soil Groups in Hanoi Area and Assessment of Their Using Ability in Construction. Ph.D. Thesis, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam, 1995. P. 74–94. (in Vietnamese).
14. Thu T.M., Fredlund D.G. Modeling Subsidence in the Hanoi City area, Vietnam // Canadian Geotechnical Journal. – 2000. – № 37 (7). – P. 621–637.
15. Карта районирования оседания земной поверхности в городе Ханое на основе результатов мониторинга // Конфедерация планирования и исследования водных ресурсов Северного региона Вьетнама (КПИВРСРВ). – Ханой: Изд-во «КПИВРСРВ», 1995. – 1 лист.
16. Фи Х.Т., Строкова Л.А., Нгуен Н.М. Оценка и прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой (Вьетнам) // Инженерная геология. – 2012. – № 2. – С. 52–59.
17. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Опасные геологические процессы на территории г. Ханой (Вьетнам) // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – № 349. – С. 200–204.
18. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 27. – 6 с.
19. Ле В.З. Новые решения проблемы сейсмичности Вьетнама: автореф. дис.... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2011. – 24 с.
20. Нгуен Д.М. Инженерно-геологическое обеспечение освоения подземного пространства г. Ханоя (Вьетнам): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – СПб., 2010. – 24 с.
21. Center for Water Resources Planning and Investigation (CWRPI). Report on Water Resources in Hanoi, Vietnam. – Hanoi: CWRPI, 2011. – № 10. – P. 75–92. (in Vietnamese).
22. Geographic Atlas of Vietnam. – Hanoi: DSMV, 1999. – P. 19–22.
23. Phai V.V. Geology, Geomorphology and Natural Resources of Hanoi, Vietnam. – Hanoi, Vietnam: Hanoi Publisher, 2011. – P. 81–93. (in Vietnamese).
24. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология – Специальная инженерная геология. – Л.: Недра, 1978. – 496 с.
25. Strokova L.A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement / Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 24. – 6 с.
26. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia) / L.A. Strokova, E.M. Dutova, A.V. Ermolaeva, I.N. Alimova, A.B. Strelnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 27. – 6 с.
27. 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. – № 43. – 6 с.
28. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 с.

29. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 с.
30. Leonova A.V., Khabibullin R.R., Baranova A.V. Geotechnical conditions contributing to negative geological process development in urban areas (the case of Kemerovo-city) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.

*Поступила 24.03.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Фи Хонг Тхинь**, кандидат геолого-минералогических наук, преподаватель кафедры геотехники Строительного факультета Университета транспорта и коммуникаций.

**Строкова Л.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

## CLASSIFICATION OF SOIL TYPES FOR HANOI (VIETNAM) WHEN STUDYING LAND SUBSIDENCE AT GROUNDWATER EXTRACTION

Phi Hong Thin<sup>1</sup>,  
phthinh.tomsk@gmail.com

Lyudmila A. Strokovaya<sup>2</sup>,  
strokovaya@sibmail.com

<sup>1</sup> University of Transport and Communications,  
3 Cau Giay Street, Lang Thuong Ward, Dong Da District, Hanoi, Vietnam.

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

*The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to study land subsidence in Hanoi (Vietnam). Hanoi is one of the largest cities in Asia with the developed industry, infrastructure and high population density. The city is located in the area with complicated natural conditions and active earthquake. A characteristic feature of the geological structure in the city is the presence of soft soils with large thickness and intensive manifestation of dangerous natural and man-made geological processes. One of them is land subsidence caused by intensive groundwater exploitation for water supply. Water consumption in Hanoi is increasing annually. The land subsidence is followed by deformations and damages of engineering structures.*

**The main aim** of the study is classification of soil types and establishment of map of soil type distribution for prediction of land subsidence in Hanoi caused by the groundwater extraction.

**The methods used in the study:** collecting and analyzing data on geology, hydrology, soil properties.

**The results.** The paper introduces the properties of quaternary deposits, engineering-geological sections, maps of thickness and distribution of soft soils and a map of stratum subdivision for Hanoi territory. The strata are subdivided into 4 classes, 6 types and 9 kinds. The types that mainly predetermine land subsidence after groundwater drawdown are pointed out. The results can be used to predict other engineering-geological processes due to the changes in natural conditions and human activities in Hanoi.

### Key words:

Land subsidence, soft soils, strata subdivision, Hanoi.

*The research was supported by the Vietnam State Fund of Education and Training (project code: ĐTĐL.2012-T/28).*

### REFERENCES

1. *Report on water resources in Hanoi, Vietnam* (for the Center for Water Resources Planning and Investigation (CWRPI)). Hanoi, Vietnam, CWRPI, 2011. 187 p. (in Vietnamese)
2. Vu V.P. *Geology, geomorphology and natural resources of Hanoi, Vietnam*. Hanoi, Vietnam, Hanoi Publisher, 2011. 280 p. (in Vietnamese)
3. Barends F.B.J., Brouwer F.J.J., Schroder F.H. Land subsidence. *Proceedings of the fifth international symposium on land subsidence*. London, IAHS Press, 1995. 92 p.
4. Hu R.L., Yue Z.Q., Wang L.C., Wang S.J. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 2004, no. 76, pp. 65–77.
5. Joseph F.P. *Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal*. Michigan, Book Crafters, 1984. 340 p.
6. Nguyen H.P. *Report on research and prediction of land subsidence due to changes in engineering geological and hydrogeological conditions in Thanh Tri District*. Hanoi, Vietnam, Hanoi University of Mining and Geology, 2004. 230 p. (in Vietnamese)
7. Nguyen H.P. *Report on collecting and verifying data, additional studies for mapping of soft soils distribution in Hanoi to plan for construction in the Capital of Vietnam*. Hanoi, Vietnam, Hanoi University of Mining and Geology, 2004. 261 p. (in Vietnamese)
8. *Report on research program on Hanoi land subsidence due to changing of groundwater level* (for the Hanoi Institute of Building Technology (HIBT)). Hanoi, Vietnam, HIBT, 2004. 125 p. (in Vietnamese)
9. Giao P.H., Ovaskainen E. Preliminary assessment of Hanoi land subsidence with reference to groundwater development. *Lowland Technology International*, 2000, no. 2 (2), pp. 17–29.
10. Hanoi Institute of Building Technology (HIBT). *Report on Research Program on Hanoi Land Subsidence due to Changing of Groundwater Level*. Hanoi, HIBT, 2004. No. 38, pp. 41–70. (in Vietnamese)
11. Phuong N.H. *Report on Research and Prediction of Land Subsidence due to Changes in Engineering Geological and Hydrogeological Conditions in Thanh Tri District*. Hanoi, Vietnam, Hanoi University of Mining and Geology, 2004. pp. 150–154. (in Vietnamese)
12. Phuong N.H. *Report on Collecting and Verifying Data, Additional Studies for Mapping of Soft Soils Distribution in Hanoi to Plan for Construction in the Capital of Vietnam*. Hanoi, Vietnam, Hanoi University of Mining and Geology, 2004. pp. 101–163. (in Vietnamese)
13. Thang L.T. *Research on Classification of Soft Soil Groups in Hanoi Area and Assessment of Their Using Ability in Construction*. Ph.D. Thesis. Hanoi, Vietnam, Hanoi University of Mining and Geology, 1995. pp. 74–94. (in Vietnamese)
14. Thu T.M., Fredlund D.G. Modeling Subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, no. 37 (7), pp. 621–637.
15. *Karta rayonirovaniya osedaniya zemnoy poverkhnosti v gorode Khanoe na osnove rezultatov monitoringa* [Zoning map of the earth surface subsidence in Hanoi on the basis of monitoring results]. Hanoi, KPIVRSRV, 1995. 1 p.

16. Phi H.T., Strokova L.A., Minh N.N. Assessment and prediction of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam. *Journal of Engineering Geology*, 2012, no. 2, pp. 52–59. In Rus.
17. Phi H.T., Strokova L.A. Geohazards in Hanoi, Vietnam. *Journal of Tomsk State University*, 2011, no. 349, pp. 200–204. In Rus.
18. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2015, vol. 27, 6 p.
19. Le V.Z. *Novye resheniya problemy seysmichnosti Vetnama*. Dis. Kand. nauk [New solutions to problems of seismicity of Vietnam. Cand. Diss.]. Moscow, 2011. 24 p.
20. Nguyen D.M. *Inzhenerno-geologicheskoe obespechenie osvoeniya podzemnogo prostranstva g. Hanoya (Vietnam)*. Dis. Kand. nauk [Engineering-geological provision of development of underground space of Hanoi (Vietnam). Cand. Diss.]. St-Petersburg, 2010. 24 p.
21. *Report on Water Resources in Hanoi, Vietnam*. Hanoi, CWRPI, 2011. No. 10, pp. 75–92. (in Vietnamese).
22. *Geographic Atlas of Vietnam*. Hanoi, DSMV, 1999. pp. 19–22.
23. Phai V.V. *Geology, Geomorphology, and Natural Resources of Hanoi, Vietnam*. Hanoi, Vietnam, Hanoi Publisher, 2011. pp. 81–93. (in Vietnamese).
24. Lomtadze V.D. *Inzhenernaya geologiya – Spetsialnaya inzhenernaya geologiya*. [Engineering Geology: Special engineering Geology]. St-Petersburg, Nedra Publ., 1978. 496 p.
25. Strokova L.A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement. Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, 6 p.
26. Strokova L.A., Dutova E.M., Ermolaeva A.V., Alimova I.N., Strelnikova A.B. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 6 p.
27. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
28. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
29. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 6 p.
30. Leonova A.V., Khabibullin R.R., Baranova A.V. Geotechnical conditions contributing to negative geological process development in urban areas (the case of Kemerovo-city). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 6 p.

Received: 24 March 2017.

#### Information about the authors

**Phi Hong Thin**, Cand. Sc., Lecturer, University of Transport and Communications.

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



УДК 564.7+563.6(292.515)

## КОМПЛЕКСЫ МШАНОК (BRYOZOA) И КОРАЛЛОВ (RUGOSA) ЭМССКОГО ЯРУСА ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Мезенцева Ольга Петровна<sup>1</sup>,  
MesentsevaOP@yandex.ru

Гумерова Нина Вадимовна<sup>2</sup>,  
gumerovanv@yandex.ru

Удодов Юрий Вадимович<sup>3</sup>,  
y.udodov@yandex.ru

Глушков Станислав Юрьевич<sup>2</sup>,  
4eu3ep13@mail.ru

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет,  
Россия, 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

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

<sup>3</sup> Новокузнецкий филиал Кемеровского государственного университета,  
Россия, 654079, г. Новокузнецк, пр. Металлургов, 19.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью уточнения эволюции мшанок и ругоз в эмсском веке в связи с внесением изменений в стратиграфическую схему девона Салаира.

**Цель работы:** проанализировать смену комплексов мшанок и ругоз западной части Алтае-Саянской складчатой области в течение эмсского века с целью выявления рубежей их обновления.

**Методы исследования.** Мшанки и ругозы изучены в тонких ориентированных срезах (шлифах) под бинокулярным микроскопом согласно общепринятым методикам. При определении границ видов использованы методы математической статистики.

**Результаты.** Уточнение и совершенствование стратиграфической схемы эмсского яруса девона Салаира в связи с появлением новых данных по конодонтам вызвало необходимость анализа эволюции других групп фауны. Сделан сравнительный анализ распространения комплексов мшанок и ругоз, а также рубежей их обновления в разрезах эмсского яруса западной части Алтае-Саянской складчатой области. Установлено, что эмсский комплекс мшанок и ругоз четко отличается как от пражского, так и от эйфельского. Комплекс мшанок включает три четко различающиеся ассоциации, характеризующие нижне-среднесалаиркинскую, верхнесалаиркинско-среднешандинскую и верхнешандинскую интервалы разреза эмсского яруса. Мшанки нижнесалаиркинской ассоциации испытывают расцвет в среднесалаиркинское время, образуя единую ассоциацию, характеризующую нижне-среднесалаиркинскую биозону. Таким образом, отнесение нижнесалаиркинских слоев к пражскому ярусу нецелесообразно. Ассоциация мшанок «беловского» горизонта не отличается от ассоциаций как верхнесалаиркинских, так и нижне-среднешандинских слоев. По ругозам «беловский» горизонт на территории Горного Алтая прослеживается отчетливо, в отличие от Салаира. Расцвет ругоз приходится на позднесалаиркинско-ранне-среднешандинское время. Верхнешандинский комплекс ругоз отличается от нижне- и среднешандинского, хотя и не уступает по разнообразию видов. Эйфельские ругозы характеризуются заметным обеднением видов на Салаире и практически полным отсутствием в Горном Алтае. Рубежом обновления пражского и эмсского комплексов является граница раздела малобачатских и нижнесалаиркинских слоев. Рубежом обновления эмсского и эйфельского комплексов является граница раздела верхнешандинских и малосалаиркинских слоев.

### Ключевые слова:

Биостратиграфия, мшанки, кораллы ругозы, эмс, девон, западная часть Алтае-Саянской складчатой области.

Уточнение и совершенствование стратиграфической схемы девона Салаира происходит постоянно после стратиграфического совещания 1979 г. [1]. Однако за последние 15 лет произведены существенные ее изменения вследствие появления новых данных по конодонтам. Был упразднен беловский горизонт, поскольку в типовых выходах в районе г. Гурьевска (разрезы этого горизонта в Акарачкинском карьере) и по рч. Баскускан были обнаружены конодонты зоны *serotinus* [2]. На основе анализа цикличности процессов седиментации и, соответственно, эволюции морских биот в сводном разрезе нижнего девона Салаира было выделено

четыре мегацикла: лохковский, позднелохковско-раннепражский, позднепражско-раннеэмсский и позднеэмсский [3]. Лохковскому мегациклу отвечают сухие, томскозаводские и петцевские слои; позднелохковско-раннепражскому – крековские и малобачатские слои; позднепражско-раннеэмсскому – нижне-, средне-, верхнесалаиркинские и нижнешандинские слои; позднеэмсскому – средне- и верхнешандинские слои. В результате нижнесалаиркинские слои предлагается включить в пражский ярус, а нижнюю границу эмсского яруса провести в основании среднесалаиркинских слоев, в которых содержатся конодонты зоны *kitabicus* [4].

Авторы статьи попытались сопоставить данные по эволюции мшанок и ругоз и предложенный вариант стратиграфической схемы эмского яруса Салаира [4]. Материалом для написания статьи явились коллекции мшанок и ругоз, отобранные из разрезов эмских отложений западной части Алтае-Саянской складчатой области (АССО) [5–7]. К настоящему времени в эмском ярусе АССО известно 110 видов мшанок (в том числе 24 в открытой номенклатуре), относящихся к пяти из восьми отрядов мшанок палеозоя. Распределение мшанок по отрядам следующее: трепостомиды – 58 видов, относящихся к 16 родам, фенестеллиды – 29 видов из 16 родов; цистопориды – 9 видов из 7 родов; рабдомезиды – 7 видов из 4 родов; криптостомиды – 6 видов из 4 родов [8, 9]. Из ругоз известно около 30 видов и подвидов, относящихся к 12 семействам, 3 отрядам и 2 надотрядам [10]. В табл. 1, 2 помещены данные по распространению мшанок и ругоз лишь в некоторых разрезах, характеризующих наиболее полно приграничные интервалы эмского яруса Салаира.

В истории развития мшанок и ругоз Салаира в течение эмского века выделено два рубежа обновления: средне-позднесалаиркинский и средне-позднешандинский, и три местные биостратиграфические зоны [11]. Зона *Kuzbassus admirandus* – *Eridotrypa neocallosa* была установлена в разрезах окрестностей г. Гурьевска по появлению и вымиранию видов-индексов. Стратотип зоны – верхи нижнесалаиркинских и среднесалаиркинские слои. Характерными видами мшанок здесь являются *Neotrematopora multi* Mesentseva, *Cyphotrypa minor* Mesent., *Eostenopora notabilisica* Mesent., *Fistuliphragma sibirica* Mesent. Характерными видами ругоз являются *Acanthophyllum breviforme* (Zhelt), *Lyriellasma fasciculum* (Zhmaev), *Fasciphyl- lum gorskii* (Bulvanker).

Зональный комплекс мшанок отличается большим разнообразием представителей отряда Трепостомиды, поскольку вмещающие породы относятся к карбонатной литофации (табл. 1): *Lioclema florea* Modzalevskaja, *L. polymorpha* Mesent., *Eridotrypa neocallosa* Mesent., *Neotrematopora spinula* Mesent., *N. multi* Mesent., *N. leptoclada* Mesent., *N. salairiensis* (Morozova), *Chondraulus salairiensis* Mesent., *Cyphotrypa minor* Mesent., *Eostenopora notabilisica* Mesent., *Kuzbassus admirandus* Mesent. Представители других отрядов не выдерживают конкуренции с трепостомидами: отряд Cystoporida представлен *Ganiella parva* Jaroshinskaja и *Fistuliphragma sibirica* Mesent., а отряд Cryptostomida – *Vadimella devonica* Mesent. и *V. optima* Mesent. [8, 9, 12]. Представители отряда Fenestellida, обычно приуроченные к литофациям алевролитов, аргиллитов и известковистых аргиллитов, немногочисленны – *Semifenestella sardjalensis* (Nekhoroshev), *Neohemitrypa* aff. *nativa* (Jarosh.). Ругозы карбонатной литофации представлены отрядами *Streptelasmata* и *Columnariida*, которые включают виды (табл. 1): *Acanthophyllum breviforme*

(Zhelt.), *Mansuiphyllum soeticum* (Schluter), *Dendrostella columnaris* Zhelt., *Fasciphyl- lum gorskii* (Bulvanker), *F. submassivum* Bulv., *Spongophyl- lum halisitoides* Ether, *Lyriellasma fasciculum* (Zhmaev), *Thamnophyllum rzhonsnickajae* Peetz, *Loyolophyllum salairicum* Ivania.

Большая часть видов зонального комплекса мшанок имеет распространение только в границах зоны (табл. 1). Виды мшанок пражского яруса АССО в комплексе отсутствуют. Пять видов мшанок проходят в зону *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida*. Из них виды *Ganiella parva* Jarosh., *Neotrematopora leptoclada* Mesent., *N. salairiensis* (Moroz.) характерны для зоны *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida*, а в интервале зоны *Kuzbassus admirandus* – *Eridotrypa neocallosa* представлены единичными колониями. Виды *Lioclema polymorpha* Mesent. и *Neotrematopora spinula* Mesent. вымирают в интервале зоны *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida* (в поздне-салаиркинское время). Из ругоз в следующую зону переходят 3 вида: *Mansuiphyllum soeticum* (Schluter), *Fasciphyl- lum gorskii* (Bulvanker), *F. submassivum* Bulv. Все они широко распространены в границах зоны. Таким образом, анализ приграничного комплекса мшанок и ругоз эмского яруса показывает, что отнесение нижнесалаиркинских слоев к пражскому ярусу, как это сделано в предлагаемой схеме [4], нецелесообразно.

За пределами АССО некоторое сходство комплекса зоны *Kuzbassus admirandus* – *Eridotrypa neocallosa* имеет с мшанками сарджальского горизонта (верхи прагиена – низы эмса) Джунгаро-Балхашской палеобиогеографической провинции Казахстана [13]. Одновозрастными мшанкам сарджальского горизонта В.П. Нехорошев считал мшанки окрестностей с. Курья: в комплексах имеется 4 общих вида, в том числе руководящий – *Rarifenestella geometrica* (Nekh.) [14]. В зональном комплексе *Kuzbassus admirandus* – *Eridotrypa neocallosa* вид *Rarifenestella geometrica* (Nekh.) отсутствует, общими видами с мшанками сарджальского горизонта являются 3 из 42 видов: *Semifenestella sardjalensis* (Nekh.), *Neotrematopora salairiensis* (Moroz.) и *Neohemitrypa* aff. *nativa* (Jarosh.). Таким образом, комплекс зоны *Kuzbassus admirandus* – *Eridotrypa neocallosa* является, вероятно, более молодым по отношению к сарджальскому и курьянскому и имеет специфические отличия. Вид *Lioclema florea* Modz. известен в больше-неверском горизонте Приамурья [15].

Вторая зона эмского яруса (*Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida*) была установлена в Гурьевском районе Салаира [11]. Стратотип зоны – верхне-салаиркинские, ниже- и среднешандинские слои. Нижняя граница зоны фиксируется появлением вида-индекса *Eridotrypa beloviensis*, а верхняя – вымиранием обоих видов-индексов. В настоящее время этот интервал отвечает конодонто-вым зонам *excavatus*, *gronbergi*, *nothoperbonus*, *inversus* [2, 4]. Ругозы авторами здесь не отбирались.

**Таблица 1.** Распространение мшанок и ругоз на границе пражского и эмского ярусов в разрезах Салаира

**Table 1.** Dispersal of Bryozoa and Rugose corals on the border of Pragian and Emsian Stages in Salair sections

Ярус/Stage	Пражский/Pragian		Эмский/Emsian			
Биостратиграфические зоны по конодонтам Biostratigraphic zones on conodonts	<i>kindlei</i>	<i>pireneae</i>	<i>kitabicus</i>			<i>excavatus-gronbergi-nothoperbonus-inversus</i>
Салаир (горизонт, слои) Salair (Horizon, Beds)	Малобачатский Maly Bachat		Нижне-салаиркин. Lower Salairka	Средне-салаиркин. Middle Salairka	Верхнесалаир- среднешандинские Upper Salairka- Lower-Middle Shanda	
Зоны по мшанкам Biostratigraphic zones on bryozoans	–		<i>E. neocallosa</i> – <i>K. admirandus</i>			<i>E. beloviensis</i> – <i>L. lucida</i>
Разрезы Sections	Стратотип Stratotype	Б-819 (слой 08) B-819 (Bed 08)	Стратотип (Б-793, слой 0) Stratotype (B-793, Bed 0)	Б-819 (слои 07–10) B-819 (Beds 07–10)	Стратотип (Б-793, слои 1–11) Stratotype (B-793, Beds 1–11)	Б-819 (слои 11–14) B-819 (Beds 11–14)
<b>МШАНКИ/BRYOZOA</b>						
<b>Отряд Cystoporida/Order Cystoporida</b>						
<i>Fistuliphragma sibirica</i> Mesent., 2016						
<i>Ganiella parva</i> Jarosh., 1968						
<b>Отряд Trepotomida/Order Trepotomida</b>						
<i>Neotrematopora salairiensis</i> (Moroz., 1961)						
<i>Chondraulius salairiensis</i> Mesent., 2012						
<i>Lioclema florea</i> Modz., 1965						
<i>Neotrematopora leptoclada</i> Mesent., 2000						
<i>Lioclema polymorpha</i> Mesent., 1997						
<i>Eridotrypa neocallosa</i> Mesent., 2012						
<i>Neotrematopora spinula</i> Mesent., 2011						
<i>Neotrematopora multi</i> Mesent., 2000						
<i>Cyphotrypa minor</i> Mesent., 2012						
<i>Eostenopora notabilisica</i> Mesent., 2003						
<i>Kuzbassus admirandus</i> Mesent., 2010						
<b>Отряд Cryptostomida/Order Cryptostomida</b>						
<i>Vadimella devonica</i> Mesent., 2013						
<i>Vadimella optima</i> Mesent., 2013						
<b>Отряд Fenestellida/Order Fenestellida</b>						
<i>Neohemistrypa aff. nativa</i> (Jarosh., 1968)						
<i>Semifenestella sardjalensis</i> (Nekh., 1977)						
<b>РУГОЗЫ/RUGOSA</b>						
<b>Отряд Streptelasmatida/Order Streptelasmatida</b>						
<i>Acanthophyllum breviforme</i> (Zhelt)						
<i>Mansuophyllum soeticum</i> Schluter						
<b>Отряд Cystiphyllida/Order Cystiphyllida</b>						
<i>Tryplasma altaica</i> (Dyb.)						
<i>Tryplasma hercynica</i> (Peetz)						
<b>Отряд Columnariida/Order Columnariida</b>						
<i>Dendrostella columnaris</i> Zhelt.						
<i>Fasciphyllum gorskii</i> (Bulvanker)						
<i>Thamnophyllum rzhonsnickajae</i> Peetz						
<i>Loyolophyllum salairicum</i> Ivania						
<i>Fasciphyllum submassivum</i> Bulv.						
<i>Spongophyllum halisitoides</i> Ether						
<i>Lyrielasma fasciculum</i> (Zhmaev)						



**Таблица 2.** Распространение мшанок и ругоз на границе эмсского и эйфельского ярусов в разрезах Салаира

**Table 2.** Dispersal of Bryozoa and Rugose corals on the border of Emsian and Eifelian Stages in Salair sections

Ярус/Stage	Эмсский/Emsian			Эйфельский/Eifelian	
Биостратиграфические зоны по конодонтам Biostratigraphic zones on conodonts	<i>serotinus-patulus</i>			<i>partitus</i>	
Салаир (горизонт, слой)/Salair (Horizon, Beds)	Верхнешандинские/Upper Shanda			Малосалаиркинский/Maliy Salairka	
Зоны по мшанкам Biostratigraphic zones on bryozoans	<i>L. akarachika</i> – <i>R. ubensis</i>			<i>E. distribute</i>	
Разрезы/Sections	Аккарачкинский карьер: 2.IIb, B-8315 Akarachkino Quarry: 2.IIb, B-8315	B-8225 B-8225	Р. Кара-Чу- мыш Kara-Chumish River	Стратотип B-7918 The stratotype B-7918	Малосалаиркинский карьер: B-8317, B-8318 Malaya Salairka Quarry: B-8317, B-8318
<b>МШАНКИ/BRYOZOA</b>					
<b>Отряд Cystoporida/Order Cystoporida</b>					
<i>Fistulipora salairiensis</i> Mesent., 2016	+	+			
<i>Fistuliphragma moniliformis</i> Mesent., 2016	+	+			
<i>Fistuliramus fasciculus</i> Mesent., 2016	+	+			
<b>Отряд Trepostomida/Order Trepostomida</b>					
<i>Lioclema akarachica</i> J. Udodov, 2010	+	+			
<i>Lioclema optima</i> Mesent., 2012		+	+	+	+
<i>Lioclema salairiense</i> Moroz., 1961		+	+		
<i>Lioclema schandiensis</i> Mesent., 1997	+				
<i>Paralioclema magnum</i> Astr. 1968	+				
<i>Paralioclema volkovaе</i> Mesent., 1997		+			
<i>Neotrematopora pulchra</i> J. Udodov, 2009		+	+	+	
<i>Neotrematopora yolkini</i> Mesent., 2000	+				
<i>Neotrematopora vulgaris</i> Mesent., 2000	+	+			
<i>Minussina udodovi</i> Mesent., 2012		+			
<i>Leptotrypa prima</i> (Duncan, 1939)		+			
<i>Eridotrypella pluristratosa</i> J. Udodov, 2003	+				
<i>Eostenopora</i> aff. <i>tenuitubulosa</i> Mesent., 2012	+				
<i>Kysylschinipora schandiensis</i> Mesent., sp. nov.	+				
<b>Отряд Rhabdomesida/Order Rhabdomesida</b>					
<i>Salairella petaloida</i> Mesent., 2015		+			
<i>Lenapora gurievensis</i> Mesent., 2015	+				
<b>Отряд Cryptostomida/Order Cryptostomida</b>					
<i>Niigaella formosa</i> L. Nekhorosheva, 1977		+			
<b>Отряд Fenestellida/Order Fenestellida</b>					
<i>Fenestella salairica</i> Mesent., sp. nov.	+				
<i>Rectifenestella covae</i> Suarez Andres & Ernst, 2015	+	+			
<i>Spinofenestella capillate</i> (Krasn., 1962)	+				
<i>Spinofenestella</i> cf. <i>estrellita</i> (McKin. and Kriz, 1986)	+				
<i>Spinofenestella fragila</i> (Krasn., 1962)	+				
<i>Rarifenestella</i> aff. <i>novochatskii</i> (Nekh., 1949)	+				
<i>Eosemicoscinium ubense</i> (Nekh., 1948)	+				
<i>Semifenestella kurjensis</i> (Nekh., 1948)	+				
<i>Reteporina gigantea</i> Nekh., 1948	+				
<i>Reteporina ubensis</i> Nekh., 1948	+				
<i>Semicoscinium striatum</i> Nekh., 1948	+				
<i>Septopora salairensis</i> Mesent., 2011		+			
<i>Polyporella gurievsensis</i> Mesent., 2011	+				
<b>РУГОЗЫ/RUGOSA</b>					
<b>Отряд Columnariida/Order Columnariida</b>					
<i>Fasciphyllum gorskii</i> (Bulv.)	+	+			
<i>Fasciphyllum submassivum</i>	+	+			
<i>Lyriellasma denticulata</i> (Zheldt.)	+				
<i>Dendrostella rhenana</i> (Frech.)		+			
<i>Neospongophyllum variabile</i> Wdtkd.			+		

Окончание табл. 2

Table 2

Ярус/Stage	Эмсский/Emsian			Эйфельский/Eifelian	
Биостратиграфические зоны по конодонтам Biostratigraphic zones on conodonts	<i>serotinus-patulus</i>			<i>partitus</i>	
Салаир (горизонт, слои)/Salair (Horizon, Beds)	Верхнешандинские/Upper Shanda			Малосалаиркинский/Maliy Salairka	
Зоны по мшанкам Biostratigraphic zones on bryozoans	<i>L. akarachika</i> – <i>R. ubensis</i>			<i>E. distribute</i>	
Разрезы/Sections	Аккарачкинский карьер: 2.11б, Б-8315 Akarachkino Quarry: 2.11б, В-8315	Б-8225 В-8225	Р. Кара-Чу- мыш Kara-Chumish River	Стратотип Б-7918 The stratotype В-7918	Малосалаиркинский карьер: Б-8317, Б-8318 Malaya Salairka Quarry: В-8317, В-8318
<b>Отряд Streptelasmatida / Order Streptelasmatida</b>					
<i>Tabulophyllum schluteri</i> (Peetz)	+				
<i>Mansuyphyllum soeticum</i> (Schluter)					
<i>Charactophyllum schandiense</i> (Zhelt)				+	
<i>Neostriophyllum mamontovensis</i> (Zhelt.)		+	+		
<i>Grypophyllum gracile</i> Wdkd.			+		
<i>Grypophyllum gurjevskiensis</i> Zhelt			+		
<b>Отряд Cystiphyllida / Order Cystiphyllida</b>					+
<i>Pseudomicroplasma fongi</i> Joh	+			+	
<i>Pseudozonophyllum versiforme</i> (Marcov)			+		
<i>Rhisophyllum enorme</i> Ether.					
<i>Digonophyllum magnum</i> (Zhelt.)	+				
<b>Отряд Kodonophyllida / Order Kodonophyllida</b>					
<i>Calceola</i> sp.	+				

Зоне *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida* соответствует поздне-салаиркино-ранне-среднешандинский комплекс мшанок Салаира с характерными видами *Fistuliphragma moniliformis* Mesent., *Fistuliporidra hiberna* Ernst et Buttler, *Lioclema pseudogloria* Mesent., *Paralioclema volkovae* Mesent., *Atactotoechus kwangsiensis* Hu Zhao-xun, *Phaenopora altaica* (Astrova), *Ensiphragma mirabilis* Astr. Комплекс мшанок «беловского» горизонта в стратотипическом разрезе (Б-819) практически идентичен комплексу верхнесалаиркинских слоев, причем большинство его видов испытывают расцвет в ранне-среднешандинское время [8, 9, 11]. В известняках Аккарачкинского карьера, относимых к «беловскому» горизонту, мшанок не обнаружено.

Зональный комплекс *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida*, как и комплекс предыдущей зоны, характеризуется доминированием представителей отряда Trepostomida, поскольку фации благоприятны для них. Среди трепостомид представлены: *Lioclema anuense* Jarosh., *Lioclema blandus* Jarosh., *Lioclema ganiense* Jarosh., *Lioclema khalfini* Jarosh., *Lioclema minusculum* Jarosh., *Lioclema multiacanthoporum* Astr., *Lioclema proprium* Jarosh., *Lioclema pseudogloria* Mesent., *Lioclema vulgatum* Jarosh., *Paralioclema incrustans* Jarosh., *Paralioclema magnum* Astr., *Paralioclema protea* Mesent., *Paralioclema volkovae* Mesent., *Neotrematopora salairiensis* (Moroz.), *Neotrematopora schebaliensis* Mesent., *Neotrematopora celebrata* (Jarosh.), *Neotrematopora crassiramosa* Mesent., *Neot-*

*rematopora vulgaris* Mesent., *Eridotrypa eximia* Jarosh., *Eridotrypa khomichevskensis* Jarosh., *Eridotrypa kuzbassica* Mesent., *Eridotrypa nekhoroshevi* Jarosh., *Eridotrypa vestira* Jarosh., *Atactotoechus kwangsiensis* Hu Zhao-xun, *Anomomalotoechus bublitschenkoi* (Nekh.), *Leptotrypella gurievskensis* Astr., *Leptotrypella insolens* Jarosh., *Leptotrypella pervulgata* Jarosh., *Leptotrypella praeamphelicta* Jarosh., *Leptotrypella tenuiramum* Mesent., *Eostenopora setaensis* Mesent., *Eostenopora tenuitubulosa* Mesent. Из представителей отряда Cystoporida обнаружены: *Ganiella frequens* Jarosh., *Fistuliporidra hiberna* Ernst et Buttler, *Fistulipora salairiensis* Mesent., *Fistuliphragma moniliformis* Mesent.; из отряда Cryptostomida – *Phaenopora altaica* (Astr.), *Phaenopora tenuis* (Hall), *Ensiphragma mirabilis* Astr., *Niigella formosa* L. Nekhorosheva; из отряда Fenestellida – *Fenestella glarea* Jarosh., *Eosemicoscium amurensiforme* (Jarosh.); из отряда Rhabdomesida – *Nematopora rara* Mesent., *Paracuneatopora egregia* Mesent., *Paracuneatopora kuvaschensis* Mesent.

Зона *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida* была прослежена в долине р. Томь–Чумыш в южной части Салаира. В Северной части Горного Алтая к этой зоне авторы относят сообщества мшанок и ругоз «ганинских известняков» (бассейн кл. Ганин), рассматриваемых некоторыми исследователями как «фация рифогенных известняков», залегающих внутри киреевского горизонта [16], а также кувашских слоев этого участка. Это обосновано присутствием в этих сообществах 6 видов зоны *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida*, в том чи-

сле обоих видов-индексов. В Центральном Алтае эта зона обнаружена в правобережье рч. Куваш, где найден вид-индекс *Lioclema lucida* Mesent. и характерные виды (*Lioclema pseudogloria* Mesent., *Paralioclema volkovae* Mesent., *Phaenopora altaica* (Astrova), *Ensiphragma mirabilis* Astr.) [11]. Интервалы конодонтовых зон *gronbergi*–*nothoperbonus*–*inversus* особенно полно охарактеризованы ругозами в Горном Алтае, так как там проявился максимум эмской трансгрессии. Ругозы наиболее разнообразные в известняково-алевро-пелитолитовой пачке: *Thamnophyllum rzonnickajae* Bulv., *Cystiphyllodes verae* Tcherepn., *Pseudomicroplasma salairica* (Peetz), *Mansuophyllum kuvashense* Tcherepn., *Acanthophyllum breviforme* Zhelt., *Pseudochonophyllum pseudohelianthoides* (Scherzer), *Jowaphyllum eifeliensis* (Zhelt.) Gum., *Calceola sandalina* Lam. В рифовых фациях преобладают *Xistriphyllum devonicum*, *Taimyrophyllum carinatum* [10]. Наличие в рассматриваемых отложениях *Thamnophyllum rzonnickajae* Bulv., *Taimyrophyllum carinatum* Bulv., *Calceola sandalina* Lam., характерных для среднешандинских слоев Салаира, подтверждает правомерность корреляции этих отложений. В разрезах бассейна р. Сема (район с. Шебалино) обнаружены характерные виды зоны: мшанки *Atactotoechus kwangsiensis*, *Phaenopora altaica*, *Ensiphragma mirabilis*; ругозы *Xistriphyllum devonicum*, *Thamnophyllum rzonnickajae*, *Lyriellasma fasciculum*, *Zelophyllum subdendroideum*, *Spongophyllum halisitoides*, *Fasciphyllum submassivum*, *Acanthophyllum tenuiseptatum*, *Pseudochonophyllum pseudohelianthoides*. Характерный вид *Thamnophyllum rzonnickajae* встречается здесь в изобилии.

В следующую мшанковую зону (*Lioclema akarachica* – *Reteporina ubensis*) из мшанок проходят *Paralioclema magnum* Astr., *P. volkovae* Mesent., *Neotrematopora vulgaris* Mesent., *N. crassiramosa* Mesent., *Eridotrypa kuzbassica* Mesent., *Anomomatotoechus bublitschenkoi* (Nekh.), *Eostenopora semensis* Mesent., *Niigaella formosa* L. Nekhorosheva, причем последние три вида представлены единичными экземплярами. К видам, появляющимся в интервале зоны *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida*, но широко распространенным в зоне *Lioclema akarachica* – *Reteporina ubensis*, относятся *Fistulipora salairiensis* Mesent., *Fistuliphragma moniliformis* Mesent., *Lioclema anuense* Jarosh. В целом комплекс зоны *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida* четко отличается как от более древнего (ранне-среднесалаиркинского), так и от более молодого (позднешандинского).

Виды данного комплекса встречаются в основном в Евразии. Вид *Atactotoechus kwangsiensis* Hu Zhao-xun описан из среднего девона Китая [17]. В эмском ярусе (синельнинском горизонте) юга Новой Земли известен вид *Niigaella formosa* L. Nekh. [18]. Однако наибольшее сходство комплекс этой зоны имеет с мшанками Европы. Вид зонального комплекса *Fistuliporida hiberna* Ernst et

Buttler известен в эмских отложениях (формация Esla: конодонтовые зоны *gronbergi*, *inversus*, *laticostatus*, низы *serotinus*) Северо-Западной Испании, как и представители нескольких родов фенестеллид [19, 20]. Род *Fistuliphragma* Bassler известен из нижнего девона Северо-Западной Испании, среднего девона Германии, США, Западной Сахары и верхнего карбона Китая [19, 21]. Представители рода *Paracuneatopora* Ernst впервые описаны из пражского яруса Чехии и нижнего девона Марокко [22].

Третья зона эмского яруса *Lioclema akarachica* – *Reteporina ubensis* установлена также в разрезах окрестностей г. Гурьевска (табл. 2). Нижняя граница зоны фиксируется появлением вида-индекса *Lioclema akarachica* J. Udodov, а верхняя – вымиранием обоих видов-индексов. Стратотип зоны – верхнешандинские слои. В настоящее время к верхнешандинским слоям относится только интервал конодонтовой зоны *serotinus* [2, 4]. Характерными видами позднешандинского комплекса мшанок являются *Physallidopora cantabrica* Ernst et Buttler, *Lioclema salairiense* Moroz., *Salairiella petaloida* Mesent., *Hemitrypa cornea* Nekh., *Eosemicoscium ubense* (Nekh.), *Semicoscium striatum* Nekh., *Reteporina gigantea* Nekh. [11]. Ругозы этой зоны представлены на Салаире за малым исключением теми же видами, что и в зоне *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida*. Зона *Lioclema akarachica* – *Reteporina ubensis* прослежена в Горном Алтае (изгиб кл. Ганина, окрестности сс. Сибирячихи, Лосихи, Мендурсакона, восточнее с. Курьи, бассейн рр. Кызыл-Чина и Даи) и Рудном Алтае (окрестности г. Змеиногорска и бассейн рч. Золотуха). Коллекции ругоз наиболее интересны в разрезе, описанном в правом борту р. Чарыша (окрестности с. Мендурсакон). Здесь авторами были обнаружены *Altaiophyllum belgebaschicum* Ivania, *Minussiella beljakovi* Bulv., *Cyathophyllum tscharyschense* Gumerova, *Martinophyllum massivum* Vagan., *Nardophyllum cylindricum* Wdkd., *Tryplasma aequabilis* Lonsd., *Pseudomicroplasma fongi* Joh. Наличие в рассматриваемом комплексе двух первых видов позволяет параллелизовать его с комплексами ругоз Рудного Алтая (окрестности г. Змеиногорска); а видов *Tryplasma aequabilis* и *Pseudomicroplasma fongi* – с верхнешандинскими слоями Салаира (табл. 2). Виды *Altaiophyllum belgebaschicum* и *Pseudomicroplasma fongi* являются проходящими и встречаются в эйфельское и даже в живетское время.

Зональный комплекс мшанок характеризуется доминированием отрядов Trepostomida и Fenestellida (табл. 2). Из трепостомид представлены: *Lioclema akarachica* J. Udodov, *L. optima* Mesent., *L. salairiense* Moroz., *L. schandiensis* Mesent., *Paralioclema magnum* Astr., *P. volkovae* Mesent., *Neotrematopora pulchra* J. Udodov, *N. yolcini* Mesent., *N. vulgaris* Mesent., *Minussina udodovi* Mesent., *Leptotrypa prima* (Duncan), *Eridotrypella pluristratosa* J. Udodov, *Eostenopora* aff. *tenuitubulosa* Mesent.,



*Kysylschinipora schandiensis* Mesent. [8, 9] Находки фенестеллид в основном приурочены к интервалу разреза, где наблюдалось чередование глинисто-карбонатных сланцев и слабглинистых известняков. Из фенестеллид обнаружены: *Fenestella salairica* Mesent., *Rectifenestella covae* Suarez Andres & Ernst, *Spinofenestella capillate* (Krasnopeva), *Sp. cf. estrellita* (McKinney and Kriz), *Sp. fragi-la* (Krasn.), *Rarifenestella aff. novochatskii* (Nekh.), *Eosemicoscium ubense* (Nekh.), *Semifenestella kurjensis* (Nekh.), *Reteporina gigantea* Nekh., *R. ubensis* Nekh., *Semicoscium striatum* Nekh., *Septopora salairensis* Mesent., *Polyporella gurievskensis* Mesent. Представители других отрядов этого комплекса немногочисленны: из цистопорид найдены *Physallidopora cantabrica* Ernst et Buttler, *Fistulipora salairiensis* Mesent., *Fistuliramus fasciculus* Mesent., *Fistuliphragma moniliformis* Mesent., *Fistulocladia antiqua* Кораевич; из рабдомезид – *Salairella petaloida* Mesent., *Lenapora gurievskensis* Mesent. [9]; из криптостомид – *Niigaella formosa* L. Nekh.

Комплекс мшанковой зоны *Lioclema akarachica* – *Reteporina ubensis* резко отличается от комплекса зоны *Eridotrypella distributa*, характеризующей эйфельский ярус (табл. 2). Проходящими в эйфель являются только четыре вида: *Lioclema optima* Mesent., *Neotrematopora pulchra* J. Udodov, *Raissiella fragilis* J. Udodov, *Leptotrypa prima* (Duncan). Из них вид *Lioclema optima* Mesent. характерен как для позднешандинского времени, так и для малосалаиркинского времени эйфельского века. Остальные виды представлены в этой зоне единичными колониями, а в зоне *Eridotrypella distributa* являются одними из наиболее распространенных. В интервале этой зоны появился новый род рабдомезид – *Salairella* Mesetseva, проходящий в эйфель. По латерали роды зонального комплекса распространены достаточно широко, особенно в Европе [19–26]. Вид зонального комплекса *Hemitrypa cornea* (Nekh.) известен в казахской свите верхней части эмского яруса Джунгаро-Балхашской провинции [13], *Physallidopora cantabrica* Ernst et Buttler – в нижней части верхнего эмса (зона *serotinus*) Испании [19]. В эмско-эйфельских отложениях Испании известны *Rectifenestella covae* Suarez Andres & Ernst и *Spinofenestella estrellita* (McKinney and Kriz) [20], а в Восточной Монголии (уланобинские слои) – *Fistulocladia antiqua* Кор. [27]. Из среднего девона США (Traverse Group, Мичиган) впервые была описана *Leptotrypa prima* (Duncan) [28]. Представители рода *Lenapora* Ernst & Königshof известны из среднего девона Западной Сахары [25] и Германии [26]. Вид *Niigaella formosa* L. Nekh. впервые описан из синельнинского горизонта эмского яруса юга Новой Земли [18].

Эйфельский комплекс ругоз отличается от верхнешандинского: *Neostriphophyllum mamonto-*

*vensis* (Zhelt.), *Neospongophyllum variabile* Wdkd., *Grypophyllum gracile* Wdkd., *G. gurjevskensis* Zhelt., *Dendrostella rhenana* (Frech). Общими являются только *Neostriphophyllum mamontovensis*, *Dendrostella rhenana* и *Pseudomicroplasma fungi* [29].

В заключение можно сказать, что эмский комплекс мшанок и ругоз четко отличается как от пражского, так и от эйфельского. Биостратиграфические мшанковые зоны *Kuzbassus admirandus* – *Eridotrypa neocallosa*, *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida* и *Lioclema akarachica* – *Reteporina ubensis* имеют специфические особенности видового состава и характеризуют эмский ярус. Комплекс зоны *Kuzbassus admirandus* – *Eridotrypa neocallosa* приурочен к верхам нижнесалаиркинских и среднесалаиркинским слоям, причем в раннесалаиркинское время появляется 7 из 17 видов этого комплекса. В целом раннесалаиркинские и среднесалаиркинские мшанки образуют единый комплекс, характеризующий самые низы эмского яруса. То же можно сказать и о ругозах. Комплекс зоны *Eridotrypa beloviensis* – *Lioclema lucida* характеризует верхнесалаиркинско-среднешандинский интервал эмского яруса. При этом ассоциация мшанок «беловского» горизонта не отличается от ассоциаций как верхнесалаиркинских, так и ниже-среднешандинских слоев. По ругозам, однако, есть кое-какие отличия. Вид *Jowaphyllum eifeliensis* (Zhelt.) Gum. встречается только в разрезах «беловского» горизонта Салаира и разновозрастных отложениях центральной части Горного Алтая. *Spongophyllum halisitoides* Ether., в изобилии встречающийся во всех разрезах «беловского» горизонта (до 50 % комплекса), переходит в низы ниже-среднешандинских слоев в единичных экземплярах. Вид *Fasciphylum submassivum* Bulv., широко распространенный в разрезах «беловского» горизонта (до 30 % комплекса), в ниже-среднешандинских слоях встречается редко (до 10 %). Виды *Acanthophyllum tenuiseptatum*, *Pseudohopophyllum pseudohelianthoides* также в рассматриваемых слоях встречаются в единичных экземплярах. Таким образом, по ругозам на территории Горного Алтая «беловский» горизонт прослеживается отчетливо, в отличие от Салаира, где он прослеживается слабо.

Комплекс мшанковой зоны *Lioclema akarachica* – *Reteporina ubensis* очень специфичен и характеризует верхнешандинские слои, резко отличаясь от комплекса малосалаиркинских слоев мамонтовского горизонта эйфеля Салаира. Зональные комплексы мшанок имеют общие виды с ниже-среднедевонскими комплексами мшанок Новой Земли, Приамурья, США, Казахстана и Монголии, но наибольшее сходство – с комплексом Западной Европы. Мамонтовские ругозы Салаира резко отличаются от верхнешандинского комплекса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Ч. II. Средний и верхний палеозой / под ред. В.И. Краснова. – Новосибирск, 1982. – 128 с.
2. Изох Н.Г., Язиков А.Ю., Бахарев Н.К. Возраст беловского горизонта (девон) Северо-Восточного Салаира по конодонтам // Материалы LVIII сессии Палеонтологического общества при РАН. – СПб., 2–6 апреля 2012. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. – С. 58–59.
3. Язиков А.Ю., Изох Н.Г. Периодичность экосистемных перестроек в раннем и среднем девоне Салаира // Материалы LX сессии Палеонтологического общества при РАН. СПб., 7–11 апреля 2014. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2014. – С. 147–148.
4. Язиков А.Ю. Брахиоподы и биостратиграфия среднего девона складчатого обрамления Кузнецкого бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2014. – 19 с.
5. Стратотипические разрезы нижнего и среднего девона Салаира. Теленгитский надгоризонт: терригенно-карбонатные фации / под ред. Е.А. Елкина, А.В. Каныгина. – Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1986. – 143 с.
6. Стратотипические разрезы нижнего и среднего девона Салаира. Теленгитский надгоризонт: карбонатные фации / под ред. Е.А. Елкина, А.В. Каныгина. – Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1987. – 194 с.
7. Мезенцева О.П., Удодов В.П. Эмские формации и палеотектоническое районирование территории Горного Алтая. – Новокузнецк: Изд-во КузГПА, 2007. – 103 с.
8. Мезенцева О.П. Новые данные о девонских рабдомезидах (мшанки) Салаира, Горного и Рудного Алтая // Палеонтологический журнал. – 2015. – № 2. – С. 27–35.
9. Мезенцева О.П. Цистопориды (мшанки) эмского яруса нижнего девона Салаира, Горного и Рудного Алтая // Палеонтологический журнал. – 2016. – № 4. – С. 58–67.
10. Гумерова Н.В. Девонские ругозы Горного Алтая: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1996. – 28 с.
11. Мезенцева О.П. Биостратиграфические зоны эмского яруса Алтае-Саянской складчатой области по результатам изучения мшанок // Материалы LVIII сессии Палеонтологического общества при РАН. – СПб., 2–6 апреля 2012. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. – С. 93–95.
12. Taylor P.D. Differentiating parasitism and other interactions in fossilized colonial organisms // Adv. Parasitol. – 2015. – V. 90. – P. 329–347.
13. Биостратиграфия нижнего и среднего девона Джунгаро-Балхашской провинции / Н.И. Иванова, М.А. Сенкевич, Г.А. Стукалина и др. – Новосибирск: Наука, 1991. – 334 с.
14. Нехорошев В.П. Девонские мшанки Казахстана. – М.: Недра, 1977. – 192 с.
15. Нехорошева Л.В. Девонские мшанки Приамурья // Тихоокеанская геология. – 1994. – № 2. – С. 63–75.
16. Девонские отложения окрестностей с. Сибирячихи (бассейн р. Ануя, Горный Алтай) / С.А. Степанов, Н.В. Миронова, В.Ф. Асташкина и др. // Материалы по стратиграфии и палеонтологии Сибири: Труды СНИИГГИМСа. – Новосибирск, 1972. – Вып. 146. – С. 93–103.
17. Yang K.C., Hu Z.X. Bryozoa of the Tungkingling formation of Xiangzhou, Kwangsi // Mem. Inst. Geol. and Paleon. Acad. Sinica. – 1965. – V. 12. – № 4. – P. 1–50.
18. Нехорошева Л.В. Новый род девонских мшанок Новой Земли // Новые виды древних растений и беспозвоночных СССР. – М.: Недра, 1977. – С. 95–96.
19. Ernst A., Buttler C. Cystoporate bryozoans from the Lower–Middle Devonian of NW Spain // N. Jb. Geol. Paläont. Abh. – 2012. – V. 263. – № 3. – P. 261–285.
20. Suarez A.J.L., Ernst A. Lower–Middle Devonian Fenestellidae (Bryozoa) of NW Spain implications for fenestrate paleobiogeography // Facies. – 2015. – V. 61. – P. 415–444.
21. Ernst A. Fenestrapora (Fenestrata, Bryozoa) from the Middle Devonian of Germany // Paläontol. – 2016. – V. 90. – P. 19–32.
22. Ernst A. Trepostome and cryptostome bryozoans from the Kone prusy limestone (Lower Devonian, Pragian) of Zlatý Kůň (Czech Republic) // Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia. – 2008. – V. 114. – № 3. – P. 329–348.
23. Ernst A., Tolokonnikova Z., Herbig H.-G. Uppermost Famennian bryozoans from Ratingen (Velbert Anticline, Rhenish Massif Germany) – Taxonomy, facies dependencies and palaeobiogeographic implications // Geologica Belgica. – 2015. – V. 18. – № 1. – P. 37–47.
24. Middle and uppermost Famennian (Upper Devonian) bryozoans from southern Belgium / A. Tolokonnikova, A. Ernst, E. Poty, B. Mottequin // Bull. of Geosc. – 2015. – V. 90. – № 1. – P. 33–49.
25. Ernst A., Königshof P. Bryozoan fauna and microfacies from a Middle Devonian reef complex (Western Sahara, Morocco) // Abh. Senckenberg Ges. Naturforsch. – 2010. – V. 568. – P. 1–91.
26. Ernst A. Non-fenestrate bryozoans from the Middle Devonian of the Eifel (western Rhenish Massif, Germany) // N. Jb. Geol. Paläont. Abh. – 2008. – V. 250. – № 3. – P. 313–379.
27. Копеевич Г.В. Атлас мшанок ордовика, силура и девона Монголии. – М.: Наука, 1984. – 164 с.
28. Duncan H. Trepostomatous Bryozoa from the Traverse group of Michigan // Contrib. Mus. Paleontol. Univ. Mich. – 1939. – V. 5. – № 10. – P. 171–270.
29. Гумерова Н.В. Раннеживетские ругозы Восточной части Салаира // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 14–18.

Поступила 06.03.2017 г.

## Информация об авторах

**Мезенцева О.П.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии, геодезии и безопасности жизнедеятельности Сибирского государственного индустриального университета.

**Гумерова Н.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Удодов Ю.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры географии, геологии и методики преподавания географии Новокузнецкого филиала Кемеровского государственного университета.

**Глушков С.Ю.**, бакалавр Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 564.7+563.6(292.515)

## COMPLEXES OF BRYOZOA AND RUGOSE CORALS OF EMSIAN STAGE OF WESTERN ALTAI-SAYAN FOLDED AREA

**Olga P. Mesentseva**<sup>1</sup>,  
MesentsevaOP@yandex.ru

**Nina V. Gumerova**<sup>2</sup>,  
gumerovanv@yandex.ru

**Yuriy V. Udodov**<sup>3</sup>,  
y.udodov@yandex.ru

**Stanislav Yu. Glushkov**<sup>2</sup>,  
4eu3ep13@mail.ru

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University,  
42, Kirov Avenue, Novokuznetsk, 654007, Russia.

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

<sup>3</sup> Novokuznetsk Branch of Kemerovo State University,  
19, Metallurgov Avenue, Novokuznetsk, 654007, Russia.

**The relevance** of the research is justified by the need to clarify the evolution of Bryozoa and Rugose corals in the Emsian Age due to the changes in the stratigraphic scheme of Salair.

**The aim** of the work is to analyze the change of Bryozoa and Rugose corals complexes of the western part of the Altai-Sayan Folded Area during Emsian Age to identify the boundaries of their rejuvenation.

**The methods used in the study.** Bryozoa and Rugose corals have been studied in thin oriented sections under a binocular microscope according to conventional methods. In determining the delimitation of species the methods of mathematical statistics were used.

**The results.** Clarifying and improving the stratigraphic scheme of Emsian Stage of Salair Devonian due to the appearance of new data on conodonts caused the need to analyze the evolution of the other groups of fauna. The authors have carried out the comparative analysis of the spread of Bryozoa and Rugose corals complexes, and boundaries of their rejuvenation within the Emsian Stage of the western part of the Altai-Sayan Folded Area. It was found out that the complex of Emsian Bryozoa and Rugose corals clearly differs from Pragian Stage and from the Eifelian Stage. The Bryozoa complex consists of three clearly distinguished associations that characterize the Lower and Middle Salairka, Upper Salairka – Middle Shanda and Upper Shanda section intervals of the Emsian Stage. Bryozoa of Lower Salairka association have spacious time at Middle Salairka time, forming a single association which characterizes the Lower and Middle Salairka biozone. Thus, the assignment of Lower Salairka Bed to Pragian Stage is not justified. The Bryozoa association of «Belovo» Horizon does not differ from both Higher Salairka and Lower-Middle Shanda. On Rugose corals «Belovo» Horizon is traced distinctly unlike Salair on the territory of Gorny Altai. Rugose corals spacious time coincides with the Higher Salairka and Lower-Middle Shanda period. The Upper Shanda Bed of Rugose corals differs from the Lower and Middle Shanda period, though it is on the level of the species diversity. Eifelian Rugose corals are characterized by a marked depletion of species in Salair and almost total absence in Gorny Altai. The boundary of rejuvenation of Pragian and Emsian complexes of Bryozoa and Rugose corals is the surface of discontinuity between Maliy Bachat Bed and Lower Salairka Bed. The rejuvenation of Emsian and Eifelian complexes is the surface of discontinuity between the Upper Shanda Bed and Maliy Salairka Bed.

### Key words:

Biostratigraphy, Bryozoa, Rugose corals, Emsian, Devonian, Western Altai-Sayan Folded Area.

### REFERENCES

1. Resheniya Vsesoyuznogo stratigraficheskogo soveshchaniya po do-kembriyu paleozoyu i chetvertichnoy sisteme Sredney Sibiri. Ch. II. Sredniy i verkhniy paleozoy [Decisions of the All-Union stratigraphic Meeting on Precambrian, Paleozoic and Quaternary System of Central Siberia. P. II. Middle and Upper Paleozoic]. Novosibirsk, 1982. 128 p.
2. Izokh N.G., Yazikov A.Yu., Bakharev N.K. Vozrast belovskogo gorizonta (devon) Severo-Vostochnogo Salaira po konodontam [Age of Belovo Horizon (Devonian) of Northeastern Salair on conodonts]. *Materialy LVIII sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN* [Materials of LVIII session of the Paleontological Society at the Russian Academy of Sciences]. St. Petersburg, April 2–6, 2012. pp. 58–59.
3. Yazikov A.Yu., Izokh N.G. Periodichnost ekosistemnykh perestroek v rannem i srednem devone Salaira [Frequency of ecosystem reconstructions in the Early and Middle Devonian of Salair]. *Materialy LX sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN* [Materials of LX session of the Paleontological Society at RAS]. St. Petersburg, 7–11 April 2014. pp. 147–148.
4. Yazikov A.Yu. *Brakhiopody i biostratigrafiya srednego devona skladchatogo obramleniya Kuznetskogo basseyna*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Brachiopods and biostratigraphy of the Middle Devonian folded frame of the Kuznetsk Basin. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2014. 19 p.
5. *Stratotipicheskie razrezy nizhnego i srednego devona Salaira. Telengitskiy nadgorizont: terrigenno-karbonatnye fatsii* [Stratotypic sections of the Lower and Middle Devonian of Salair. The



- Telengit superhorizon: terrigenous-carbonaceous facies]. Eds. E.A. Elkin, A.V. Kanygin. Novosibirsk, Institute of Geology and Geophysics SB AS USSR, 1986. 143 p.
6. *Stratotipicheskie razrezy nizhnego i srednego devona Salaira. Telengitskiy nadgorizont: karbonatnye fatsii* [Stratotypical key sections of the Lower and Middle Devonian of Salair. The Telengit superhorizon: carbonaceous facies]. Eds. E.A. Elkin, A.V. Kanygin. Novosibirsk, Institute of Geology and Geophysics SB AS USSR, 1987. 194 p.
  7. Mesentseva O.P., Udodov V.P. *Emsskie formatsii i paleotektonicheskoe rayonirovanie territorii Gornogo Altaya* [Emsian formations and paleotectonic zoning of the Altai-Sayan Folded Area]. Novokuznetsk, KuzGPA Publ., 2007. 103 p.
  8. Mesentseva O.P. New Data on Devonian Rhabdomesida (Bryozoans) from the Salair Ridge and Gorny and Rudny Altai. *Paleontological Journal*, 2015, no. 2 (49), pp. 134–144.
  9. Mesentseva O.P. Cystoporida (Bryozoa) from the Emsian Stage (Lower Devonian) of the Salair Ridge and Gorny and Rudny Altai. *Paleontological Journal*, 2016, no. 4 (50), pp. 376–387.
  10. Gumerova N.V. *Devonskie rugozy Gornogo Altaya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Devonian Rugose corals of Gorny Altai. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1996. 28 p.
  11. Mesentseva O.P. Biostratigraficheskie zony emsskogo yarusa Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti po rezul'tatam izucheniya mshanok [Biostratigraphic zones of Emsian Stage of the Altai-Sayan Folded Area on the results of the Bryozoa study]. *Materialy LVIII sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN* [Materials of LVIII session of the Paleontological Society at the Russian Academy of Sciences]. St-Petersburg, 2012. pp. 93–95.
  12. Taylor P.D. Differentiating parasitism and other interactions in fossilized colonial organisms. *Adv. Parasitol.*, 2015, vol. 90, pp. 329–347.
  13. Ivanova N.I., Senkevich M.A., Stukalina G.A. *Biostratografiya nizhnego i srednego devona Dzhungaro-Balkhashskoy provintsii* [Biostratigraphy of the Lower and Middle Devonian of Dzungaria-Balkhash Province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 334 p.
  14. Nekhoroshev V.P. *Devonskie mshanki Kazakhstana* [Devonian Bryozoa of Kazakhstan]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 192 p.
  15. Nekhorosheva L.V. Devonskie mshanki Priamuriya [Devonian Bryozoa of Priamurje]. *Tikhookeanskaya geologiya*, 1994, no. 2, pp. 63–75.
  16. Stepanov S.A., Mironova N.V., Astashkina V.F., Lopushinskaya T.V., Cherepnina S.K., Yaroshinskaya A.M. Devonskie otlozheniya okrestnostey s. Sibiryachikhi (basseyn r. Anuya Gorny Altay) [Devonian sediments from the surrounding area of Sibiryachikha vill. (Anui River Basin, Gorny Altai)]. *Materialy po stratigrafii i paleontologii Sibiri* [Materials on stratigraphy and paleontology of Siberia]. Novosibirsk, SNIIGGIMS Publ. (146), 1972, pp. 93–103.
  17. Yang K.C., Hu Z.X. Bryozoa of the Tungkangling formation of Xiangzhou, Kwangsi. *Mem. Inst. Geol. and Paleon. Acad. Sinica*, 1965, no. 4 (12), pp. 1–50.
  18. Nekhorosheva L.V. Novy rod devonskikh mshanok Novoy Zemli [Genus novum of Devonian Bryozoa of Novaya Zemlya]. *Novye vidy drevnikh rasteniy i bespozvonochnykh SSSR* [New species of ancient plants and invertebrates in the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1977. pp. 95–96.
  19. Ernst A., Buttler C. Cystoporata bryozoans from the Lower–Middle Devonian of NW Spain. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 2012, no. 3 (263), pp. 261–285.
  20. Suarez A.J.L., Ernst A. Lower-Middle Devonian Fenestellidae (Bryozoa) of NW Spain implications for fenestrate paleobiogeography. *Facies*, 2015, vol. 61, pp. 415–444.
  21. Ernst A. *Fenestrapora* (Fenestrata, Bryozoa) from the Middle Devonian of Germany. *Paläontol.*, 2016, vol. 90, pp. 19–32.
  22. Ernst A. Trepostome and cryptostome bryozoans from the Koněprusy limestone (Lower Devonian, Pragian) of Zlatý Kůň (Czech Republic). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 2008, no. 3 (114), pp. 329–348.
  23. Ernst A., Tolokonnikova Z., Herbig H.-G. Uppermost Famennian bryozoans from Ratingen (Velbert Anticline, Rhenish Massif, Germany) – Taxonomy, facies dependencies and palaeobiogeographic implications. *Geologica Belgica*, 2015, no. 1 (18), pp. 37–47.
  24. Tolokonnikova Z.A., Ernst A., Poty E., Mottequin B. Middle and uppermost Famennian (Upper Devonian) bryozoans from southern Belgium. *Bull. of Geosc.*, 2015, no. 1 (90), pp. 33–49.
  25. Ernst A., Königshof P. Bryozoan fauna and microfacies from a Middle Devonian reef complex (Western Sahara, Morocco). *Abh. Senckenberg Ges. Naturforsch.*, 2010, vol. 568, pp. 1–91.
  26. Ernst A. Non-fenestrate bryozoans from the Middle Devonian of the Eifel (western Rhenish Massif, Germany). *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 2008, no. 3 (250), pp. 313–379.
  27. Kopaevich G.V. *Atlas mshanok ordovika, silura i devona Mongolii* [Atlas of Bryozoa of Ordovician, Silurian and Devonian in Mongolia]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 164 p.
  28. Duncan H. Trepostomatous Bryozoa from the Traverse group of Michigan. *Contrib. Mus. Paleontol. Univ. Mich.*, 1939, no. 10 (5), pp. 171–270.
  29. Gumerova N.V. Rannezhivetskie rugozy Vostochnoy chasti Salaira [Early Givetian Rugose corals of the Eastern Salair]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 14–18. In Rus.

Received: 6 March 2017.

#### Information about the authors

**Olga P. Mesentseva**, Cand. Sc., associate professor, Siberian State Industrial University.

**Nina V. Gumerova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Yuriy V. Udodov**, Cand. Sc., associate professor, Novokuznetsk Branch of Kemerovo State University.

**Stanislav Yu. Glushkov**, bachelor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.041; 553.69; 553.578

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕВИЗИИ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ОПАЛ-КРИСТАЛЛИТОВЫХ ПОРОД В СРЕДНЕМ ЗАУРАЛЬЕ

Смирнов Павел Витальевич<sup>1,2</sup>,  
geolog.08@mail.ru

<sup>1</sup> НОЦ «Геология нефти и газа» Тюменского индустриального университета,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38/

<sup>2</sup> Институт Геологии и Палеонтологии Технического университета Клаусталь,  
Германия, 38678, Clausthal-Zellerfeld, Adolph-Roemer-Strasse, 2A.

**Актуальность.** Опал-кристаллитовые породы по масштабам площадного распространения и своему ресурсному потенциалу являются одним из главных видов неметаллических полезных ископаемых в Зауралье и потенциально отраслеобразующим для предприятий региона. По причине отсутствия ревизионных геологоразведочных работ, имеющиеся оценки ресурсного потенциала хоть и являются единственно представленными в литературе, но очевидно, что крайне приближены, к настоящему моменту потеряли актуальность и требуют дополнения. Ревизионные работы, с одной стороны, направлены на наращивание запасов опал-кристаллитовых пород, с другой – на дифференциацию пород продуктивной толщи по возрасту, литологии и качеству сырья на столь обширной территории. При уточнении географической структуры, систематизации объектов и оценке сырьевого потенциала Зауральской субпровинции должны учитываться не только месторождения, но и области приповерхностного залегания кремнистых отложений, потенциально перспективные на опал-кристаллитовое сырье.

**Цель работы:** ревизия минеральной базы опал-кристаллитовых пород, выделение перспективных участков поисковых и поисково-оценочных работ на все виды опал-кристаллитовых пород в Среднем Зауралье.

**Методы исследований:** полевые исследования, рекогносцировочные исследования, опробование.

**Результаты.** На основании изучения фондовой геологической литературы, рекомендаций тематических и геолого-съёмочных работ, а также полевых изысканий по исследованию естественных и искусственных обнажений опал-кристаллитовых пород выделены перспективные участки. Актуализирована информация по 12 перспективным на кремнистое сырье участкам, по четырем из них сведения представлены впервые. Минерально-сырьевая база опал-кристаллитовых пород имеет огромные перспективы наращивания запасов, а сами объекты расположены в районах с развитой транспортной и промышленной инфраструктурой, что упрощает их промышленное освоение и снижает объем капитальных затрат.

### Ключевые слова:

Опал-кристаллитовые породы, минерально-сырьевая база, диатомит, опока, трепел, Зауралье.

### Введение

Территория Зауралья является одной из самых перспективных на опал-кристаллитовое сырье с момента открытия первых месторождений в 30-х гг. в непосредственной близости от г. Камышлов и Ирбит. В 70-х гг. 107 месторождений и перспективных участков на кремнистое сырье с запасами промышленных категорий общим объемом в 174 млн м<sup>3</sup> диатомитов и 49 млн м<sup>3</sup> опок, разведанные на тот момент в регионе, были объединены в Зауральскую субпровинцию [1, 2]. Общий ресурсный потенциал был оценен в 15–20 млрд м<sup>3</sup>. Для сравнения, по данным Геологической Службы США [3], учтенные запасы диатомитов в США и Китае – странах-мировых лидерах по производству этой продукции – в 2016 г. составили соответственно 250 и 110 млн м<sup>3</sup>. Мировые учтенные запасы оцениваются около 1 млрд м<sup>3</sup> [4, 5] при ежегодной добыче на уровне свыше 2 млн т [6].

Справедливым будет отметить, что все оценки ресурсного потенциала для Зауральской субпровинции несколько условны, так как ранее не была четко определена ее конфигурация и границы. Положение западной границы ввиду ее крайней изменчивости, прерывистости и локализации в пределах восточной части горного обрамления Урала вообще никогда четко не было установлено. Вос-

точной границей Зауральской субпровинции считается долгота г. Верхняя Пышма (Свердловская область) [7, 8], восточнее которой не были обнаружены выходы опал-кристаллитовых пород, существенные по мощности и площади распространения, что могло бы обеспечить возможность их разработки.

Потребность в актуализации информации о минерально-сырьевой базе опал-кристаллитовых пород определяется множеством причин. В первую очередь, на протяжении почти полувека отсутствовали сколь-либо значимые полевые и лабораторные исследования по данной теме. В период ранних исследований ресурсного потенциала этого региона на кремнистое сырье большая часть территории с административной точки зрения была «закрытой». Это определило отсутствие всяких координат и откровенную неинформативность географических привязок, которые содержатся в тематических работах. Ровно по этой причине не всегда представляется возможным достоверно установить расположение ранее выделенных перспективных объектов, привязки которых были даны относительно населенных пунктов. Многие из сел и деревень были либо переименованы, либо объединены с другими населенными пунктами, либо в период после распада СССР попросту перестали су-



ществовать. Главные месторождения диатомитов – Ирбитское и Камышловское – разрабатываются с 1929 г., несколько позже начата эксплуатация Курьинского месторождения трепелов и опок, и за длительный период была выработана существенная часть их запасов, что особенно актуально для Камышловского и Курьинского месторождений.

Значимой проблемой остается отсутствие четкой дифференциации пород продуктивной толщи по возрасту, литологии, качеству сырья на столь обширной территории и четкой номенклатуры для объектов минеральной базы.

Так как ранние исследования вещественного состава опирались на ограниченный аналитико-методический аппарат, характеристика пород продуктивной толщи нередко была выполнена макроскопически в системе «диатомиты–опоки». Это уже привело к тому, что Государственным балансом России крупнейшие месторождения диатомовых глин Зауралья – Кораблевское и Шадринское – учтены как месторождения трепелов [9]. В Зауралье также широко распространены переходные и глинистые разности опал-кристаллитовых пород, а продуктивные толщи обладают определенной вариативностью и изменчивостью состава по разрезу и латерали, что может фиксироваться даже в рамках одного месторождения. Говоря о номенклатуре объектов минеральной базы, правильным будет заметить, что большинство выявленных ранее «месторождений», строго говоря, являются лишь обнажениями, действительно нередко большой протяженности и площади, но для них никогда не проводилось детальной разведки и подсчета запасов, и, соответственно, использование термина «месторождение» для них неуместно.

В силу отсутствия ревизионных геологоразведочных работ, имеющаяся систематика провинции и оценки ресурсного потенциала хоть и являются единственно представленными в литературе, но очевидно, что крайне приблизительны, к настоящему моменту потеряли актуальность и требуют дополнения.

#### Объекты и методы исследования

Настоящая работа является первой в ряде планируемых по актуализации состояния минерально-сырьевой базы ОКП в Зауралье и содержит сведения о перспективных объектах минерально-сырьевой базы опал-кристаллитовых пород в Среднем Зауралье. В административном отношении это соответствует территории юга и юго-востока Свердловской области. Материалом для настоящей работы, с одной стороны, послужило обобщение обширных фондовых материалов, с другой – полевые исследования, выполненные в 2014–2016 гг. автором в кооперации со своими коллегами (А.О. Константинов, А.А. Новоселов, Тюменский индустриальный университет).

На первом этапе произведен выбор поисковых участков на основании изучения фондовой геоло-

гической литературы, рекомендаций тематических и геолого-съемочных работ. Для постановки поисковых работ выбирались районы широкого распространения отложений верхнего палеоцена и нижнего эоцена – отложений ирбитской и серовской свит – на площадях минимальной мощности четвертичных отложений. На выбранных таким образом участках проводились общие поиски в ходе полевых маршрутов. К числу таких площадей относятся участки аллювиальных песчано-глинистых отложений пойменных террас мощностью от 2–5 м на малых реках, а также районы наиболее близкие к разведанным месторождениям опал-кристаллитовых пород. В задачу поисковых маршрутов входило уточнение положения на местности и выявление имеющихся естественных и искусственных обнажений (рис. 1). Маршруты проводились вдоль логов, оврагов, берегов ручьев и малых рек, где обнажения ирбитской и серовской свиты наиболее вероятны. Привязка точек осуществлялась с помощью GPS. В полевой дневник кроме маршрутного хода также вносилась информация о характере рельефа местности.

Изученные районы распространения морских отложений палеоцена–эоцена характеризуются преимущественно развитием диатомитов и диатомовых глин, в меньшей степени – опок и трепелов. При характеристике перспектив участков принимались во внимание минимальная мощность перекрывающих отложений и экономические факторы – удаленность участков от промышленных центров, наличие инфраструктуры и т. д. В сводной таблице для объектов, которые могут быть локализованы с помощью одной точки, кроме общей текстовой привязки даны координаты в системе WGS-84 (градусы, минуты, секунды). Для крупных поисковых участков, которые не представляется возможным оконтурить таким образом, приведены общие текстовые привязки.

#### Результаты

Опал-кристаллитовые породы приурочены к трем главным стратиграфическим объектам, которые сложены разными породами – серовской свитой палеоцена, и двум подсвитам ирбитской свиты – нижней и верхней.

Отложения серовской свиты представлены опоками, глинистыми опоками и опоквидными глинами (в зависимости от содержания глинистого материала), реже диатомитами [10], трепелами и кварц-глауконитовыми песчаниками. Последние нередко залегают в основании опок, но развиты спорадически и не рассматриваются в рамках настоящей работы как часть продуктивной толщи.

На отдельных участках площади распространения опок они фациально замещаются трепелами и опоквидными глинами, образующими большей частью прослой в опоках. Диатомиты залегают в верхней части серовской свиты, связаны с постепенными переходами в диатомиты ирбитской сви-



**Рис. 1.** Перспективные участки: а – Речкаловский; б – Брусяна; в – Юрмытский. Примечание. Автор фото Юрмытского участка В.В. Ордовский

**Fig. 1.** Promising areas: a – Rechkalovskiy; б – Brusyana; в – Yurmyskiy. Note. V.V. Ordovsky is the author of the photo from the Yurmyskiy site

ты нижнего эоцена, что макроскопически никак не фиксируется, только по смене диатомовых комплексов *Trinacria ventriculosa-Sheshukovia mirabilis* на *Coscinodiscus Uralensis-Hemiaulus Proteus* [10–12].

Однообразная толща ирбитской свиты имеет в районе площадное распространение, достигая длины д. Глядены, представлена обыкновенно диатомитами, диатомовыми, реже трепеловидными глинами. Залегание толщи почти горизонтальное (региональные углы наклона исчисляются в минутах), породы не метаморфизованы. Мощность отложений увеличивается в восточном направлении и достигает 50–60 м. В большинстве наиболее полных разрезов Зауралья свита делится на две подсвиты – нижнюю и верхнюю.

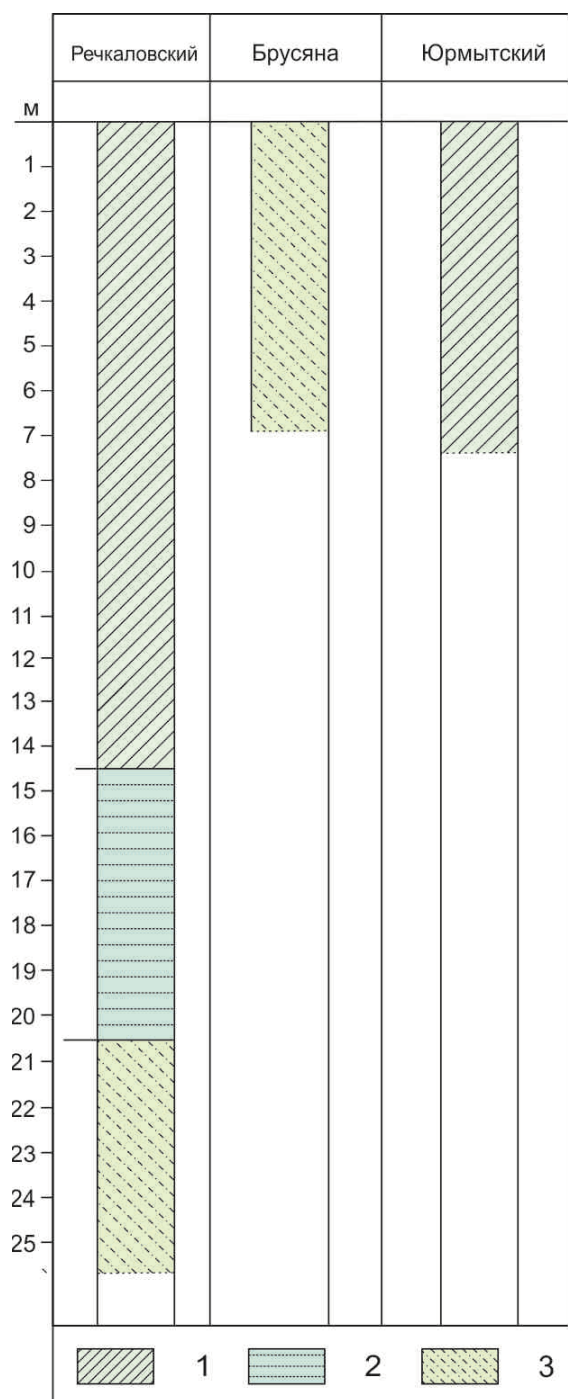
Нижнеирбитская подсвита представлена в основном диатомитами, диатомовыми, реже трепеловидными и опоковидными глинами, иногда с прослоями кварцевых и глауконит-кварцевых алевролитов и песчаников. Диатомиты светло-серые, часто с зеленоватым оттенком, в разной степени глинистые, иногда алевролитистые, слюдястые, легкие, некрепкие, часто рыхлые и мучнистые. Глинистые разности более крепкие. Диатомовые и трепеловидные глины макроскопически ничем не отличаются друг от друга и различаются только под микроскопом. Это светло-серые и серые породы, некрепкие (крошатся в руке), обычно с шероховатым землистым изломом. Диатомовые глины

содержат большое количество обломков диатомей (40–50 %), в трепеловидных глинах они малочисленны и плохой сохранности, со следами диагенетических изменений. Трепелы – породы светло-серого и светло-желтого цвета, почти целиком состоящие из пелитового материала, представленного опалом с реликтами диатомовых водорослей, примесью глинистых минералов, кварца, полевого шпата, слюды и глауконита.

Верхнеирбитская подсвита представлена серыми, зеленовато-серыми диатомовыми и монмориллонит-бейделлитовыми глинами, глинистыми диатомитами и диатомитами. Диатомовые глины светло-серые неслоистые, часто алевролитистые, довольно крепкие, иногда слабо жирные. Отмечаются растительные остатки и ходы червей, заполненные алевролитовым материалом. Глинистые диатомиты по литологическому составу близки к диатомитам нижнеирбитской свиты: отличаются от последних повышенным содержанием глинистого и алевролитового материала, несколько большим удельным весом.

Диатомиты ирбитской свиты почти всегда залегают на опоках серовской свиты. Граница диатомитов с опоками отчетливая, без следов размыва. Предполагается, что в ряде случаев наблюдается переход диатомитов в опоки через трепелы и глинистые опоки, но это положение должно быть дополнительно аргументировано в ходе лабораторных исследований.





**Рис. 2.** Представительные геологические разрезы кремнистого палеоцена–эоцена на различных поисковых участках: 1 – диатомиты; 2 – диатомиты алевритистые; 3 – трепелы. Примечание. Брусяна – приведен разрез трепелов

**Fig. 2.** Representative geological sections of siliceous Paleocene–Eocene: 1 – diatomites; 2 – aleuritic diatomites; 3 – tripolite. Note. Brusyana – tripolite section is shown

Список перспективных участков приведен в таблице. Часть перспективных зон непосредственно примыкают к крупнейшему Камышловского месторождению, являясь его продолжением во всех направлениях и фактически формируют одно су-

пер-месторождение площадью 50–75 км<sup>2</sup>. На севере изученного района диатомиты и диатомовые глины образуют выходы на правом берегу р. Ирбит прямо в черте населенных пунктов Шмакина, Симанова, Речкалово [13], Зайково, Белослудское. Перспективные объекты, выделенные впервые, тяготеют к краевым зонам изученного региона; расположены в непосредственной близости от д. Брусяна [10], на левом берегу р. Юрмач в черте с. Юрмытское, фактически у восточной границы Зауральской субпровинции [7, 8] и к востоку от жд. ст. Егоршино г. Артемовск. Все перспективные объекты, рассматриваемые в настоящей работе, можно условно разделить на три группы:

I группа – объекты минерально-сырьевой базы, выделенные ранними исследователями и для части которых даже существуют предварительные оценки ресурсного потенциала;

II группа – участки, ранее не обозначенные как перспективные, но опосредованная информация о ресурсном потенциале которых содержится в отчетах о поисково-разведочных работах на твердые и общераспространенные полезные ископаемые, в отчетах на геологическое доизучение территории, материалах мелкомасштабной съемки, результатах опорного бурения и т. д.

III группа – перспективные участки, выделенные впервые.

Локализация перспективных участков представлена на рис. 2.

#### Заключение

Регионы УрФО традиционно относятся к территориям с развитой промышленностью, ориентированной на тяжелое машиностроение, цветную и черную металлургию, горнодобывающий сектор. Следует отметить, что «узкая» промышленная специализация региона и истощение местной сырьевой базы представляет существенную угрозу для дальнейшего развития экономик регионов УрФО. Это требует поиска новых точек роста и увеличения объемов и видов продукции из сырья, ранее ограниченно вовлеченного в хозяйственный оборот. В этом случае минерально-сырьевая база является естественным конкурентным преимуществом, способным обеспечить развитие экономики и ее переход на новый экономический уклад [14].

С момента разведки месторождения Зауралья являлись сырьевой базой для производства строительных и теплоизоляционных материалов и сохранили с тех пор эту специализацию. Во всем мире неметаллические твердые полезные ископаемые рассматриваются в качестве минерального сырья многоцелевого назначения [15, 16]. Данный вид природных ресурсов востребован в подавляющем большинстве отраслей промышленности и сельского хозяйства, а его эффективное освоение является залогом динамичного развития региональных центров [17, 18]. Во всем мире с 1990 г. началась разработка новых технологических решений по расширению сферы использования кремнистых

**Таблица.** Перспективные участки на опал-кристаллитовое сырье в Среднем Зауралье

**Table.** Prospective areas for opal-cristobalite raw materials in the Middle Trans-Urals

№	Перспективный участок Prospective areas	Группа объектов Group of objects	Координаты Coordinates	Расположение Location	Ресурсный потенциал, млн м <sup>3</sup> Resource potential, mln m <sup>3</sup>	Породы полезной толщи Rocks of strata	Источник данных Data source
1	Баранниковский Barannikovskiy	III	–	на левом берегу р. Пышма между д. Баранникова, с. Реутское и п. Новый Камышловского района on the left bank of the river Pyshma between the villages Barannikova, Reutsky and Novy (Kamyshlovsky district)	–	Д	–
2	Белослудский Belosludskiy	I	57°27'27.40»N 62°41'16.66»E	коренные выходы на правом берегу р. Ирбит в черте с. Белослудское Ирбитского района outcrops on the right bank of the river Irbit in the line village Belosludskoe (Irbit District)	–	Д	2
3	Брусяна Brusyana	III	56°56'59.74»N 61°55'7.06»E	в 200 м от северо-восточной окраины д. Брусяна Сухоложского района в старом сухом русле р. Калиновка 200 m from the N-E periphery of the village Brusyana in the old dry riverbed of the river Kalinovka (Sukholozhsky district)	–	Д, О, Т	4
4	Галкинский Galkinskiy	II	56°54'4.40»N 62°44'9.31»E	в 1 км к В от с. Галкинское Камышловского района in 1 km to the E from village Galkinsky (Kamyshlovsky district)	–	Д	1
5	Егоршинский Egorshinskiy	III	57°21'39.81»N 61°57'20.07»E	в 5 км к востоку от ст. Егоршино г. Артемовск 5 km to the E of the station Egorshino (Artemovsk)	–	Д	–
6	Красногвардейский Krasnogvardeyskiy	I	57°22'47.98»N 62°16'48.26»E	к СВ от западной окраины с. Красногвардейский, старый карьер N-E from the western periphery of the village Krasnogvardeysky, the old quarry	Более 17,0	О	2
7	Кунарский Kunarskiy	II	–	в 4 км к В от д. Прищаново, в 5 км СВ г. Богданович in 4 km to E from the village Prishchanovo, 5 km N-E than Bogdanovich	–	Д	1
8	Обуховский Obukhovskiy	I	–	между железной дорогой Екатеринбург–Тюмень и расположенным к югу от нее с. Обуховское Камышловского района between the railway Ekaterinburg–Tyumen and village Obukhovskoye located to the south (Kamyshlovsky district)	13,94	Д	2
9	Речкаловский Rechkalovskiy	I	57°36'34.62»N 62°47'59.40»E	расположено между д. Речкалова и д. Симанова на правом берегу р. Ирбит located between the villages Rechkalova and Simanova on the right bank of the river Irbit	17,47	Д, Т (?)	2, 3
10	Шилкинский Shilkinskiy	II	–	в 4 км к ЮЗ от г. Камышлов, в 1,5 км В от д. Шилкино in 4 km to S-W of Kamyshlov, at 1,5 to E from the village Shilkino	–	Д	1
11	Шмаковский Shmakovskiy	II	–	в 1 км к ЮЗ от Ирбитского месторождения от д. Шмакова до д. Кириллова in 1 km to SW from the Irbit field from the villages Shmakova and Kirillova	–	Д	1
12	Юрмытский Yurmyskiy	III	57°0'17.74»N 63°4'30.54»E	на левом берегу р. Юрмач в черте с. Юрмытское on the left bank of the river Yurmach in the line of village Yurmyskoe	–	Д	–

Примечание. Д – диатомит; О – опока, Т – трепел. Источник данных: 1 – А.Р. Белоусов, И.Д. Кручинин, 1981; 2 – У.Г. Дистанов, 1974; 3 – А.И. Сидоренков и др., 1989; 4 – П.В. Смирнов, А.О. Константинов, 2016.

Note. D is diatomite; O is opoka; T is tripolite. Data source: 1 – A.R. Belousov, I.D. Kruchinin, 1981; 2 – U.G. Distanov, 1974; 3 – A.I. Sidorenkov et al., 1989; 4 – P.V. Smirnov, A.O. Konstantinov, 2016.

пород [19–21], в результате чего к настоящему моменту она включает десятки отраслей и производство сотни материалов бытового и промышленного назначения. В этой связи для реализации экономического потенциала кроме задачи расширения минеральной базы необходимо техническое переоснащение и частичная или полная переориен-

тация предприятий на производство товаров с высокой добавленной стоимостью, конкурентных и востребованных на глобальном рынке. Развитие производств материалов из кремнистых пород для нужд хозяйства в краткосрочной перспективе призвано обеспечить импортозамещение широкого спектра товаров промышленного и бытового



**Рис. 3.** Месторождения и перспективные участки на опал-кристаллитовые породы в Среднем Зауралье. I – Базовые месторождения: I – Ирбитское; Km – Камышловское; Kr – Курьинское; II – Перспективные объекты: 1 – Баранниковский; 2 – Белослудский; 3 – Брусяна; 4 – Галкинский; 5 – Егоршинский; 6 – Красногвардейский; 7 – Кунарский; 8 – Обуховский; 9 – Речкаловский; 10 – Шилкинский; 11 – Шмаковский; 12 – Юрмытский

**Fig. 3.** Deposits and promising areas for opal-cristobalite rocks in the Middle Trans-Urals. I – Basic deposits: I – Irbit; Km – Kamyshlov; Kr – Kur'; II – Promising areas: 1 – Barannikovskiy; 2 – Belosludskiy; 3 – Brusyana; 4 – Galkinskiy; 5 – Egorshinskiy; 6 – Krasnogvardeyskiy; 7 – Kunarskiy; 8 – Obukhovskiy; 9 – Rechkalovskiy; 10 – Shilkinskiy; 11 – Shmakovskiy; 12 – Yurmytskiy



назначения, а в долгосрочной перспективе послужит существенным фактором активного развития региона. Комплексное использование опал-кристаллитовых пород является одним из возможных способов обеспечения диверсификации экономики регионов УрФО и создания кластеров, способных обеспечить инновационное развитие территории [22].

В интерпретации исследователей 70-х гг. Зауральская субпровинция объединила исключительно разведанные на тот момент месторождения в регионе, экспонированные точечно на огромной территории. Анализ геологического строения, закономерностей распространения опал-кристаллитовых пород и особенностей их седиментогенеза в Зауралье позволяют утверждать, что вся зона между гг. Артемовский, Ирбит, Камышлов и Сухой Лог являются перспективной для поиска сырья. Хотя опал-кристаллитовые породы и не составляют непрерывную полосу продуктивных отложений по всему Зауралью, представляется, что в дальнейшем при уточнении географической структуры, систематизации объектов и оценке сырьевого потенциала должны учитываться не только месторождения, но и области приповерхностного залегания кремнистых отложений, потенциально перспективные на опал-кристаллитовое сырье. Площадь отдельных может достигать десятков километров. Такой подход и основанные на нем оценки

ресурсного потенциала будут много более объективны.

Как показано в настоящей работе, минерально-сырьевая база опал-кристаллитовых пород имеет огромные перспективы наращивания запасов, а сами объекты расположены в районах с развитой транспортной и промышленной инфраструктурой, что упрощает их промышленное освоение и снижает объем капитальных затрат. Продолжение ревизионных работ ставит задачу систематизации данных не только о географии объектов, но и о вещественном составе пород продуктивной толщи с соответствующим арсеналом аналитических методов. Дальнейшие поиски перспективных участков имеют целью локализацию зон, где качество сырья выше или разработка одного объекта позволит добывать сразу несколько видов опал-кристаллитовых пород. Очевидно, что при должном обеспечении экономическая эффективность эксплуатации таких месторождений кратно выше. Особый интерес с этой точки зрения представляет юго-западная часть региона.

*Автор выражает искреннюю признательность своим коллегам – И.И. Нестерову, А.О. Константинову и А.А. Новоселову (ТИУ, г. Тюмень) – за помощь в проведении полевых исследований, Т.В. Орешкиной (ГИН РАН, г. Москва), Н.И. Афанасьевой (ЦНИИГеолеруд, г. Казань) – за ценные советы и обсуждение результатов, без которых настоящая работа не могла бы состояться.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремнистые породы СССР / под ред. У.Г. Дистанова. – Казань: Татарское КИ, 1976. – 412 с.
2. Сырьевая база кремнистых пород СССР и их использование в народном хозяйстве / под ред. В.П. Петрова. – М.: Недра, 1976. – 104 с.
3. Global diatomite reserves by country 2016 // US Geological Survey. 2017. URL: <https://www.statista.com/statistics/264934/global-diatomite-reserves/> (дата обращения 18.03.2017).
4. Diatomite [Advance release] // U.S. Geological Survey minerals yearbook. – Reston: USGS, 2011. – 6 p.
5. Dolley Th.P. Diatomite // US. Geological Survey Mineral Commodity Summaries. 2008. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/250400.pdf> (дата обращения 18.03.2017).
6. Diatomite statistics // Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140. 2014. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/> (дата обращения: 16.03.2017).
7. Смирнов П.В. Перспективы расширения минеральной базы кремнистых пород в приграничной зоне Тюменской и Свердловской областей // Георесурсы. – 2015. – Т. 1. – № 4. – С. 81–84.
8. Смирнов П.В., Константинов А.О. Потенциал постэоценовых отложений Среднего Зауралья на кремнистое сырье // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2016. – № 1. – С. 115–122.
9. Смирнов П.В., Константинов А.О. Диатомовые глины Шадринского месторождения (Курганская область) // Георесурсы. – 2016. – Т. 18. – № 3. – С. 240–244. DOI: 10.18599/grs.18.3.16.
10. Смирнов П.В., Константинов А.О. Сравнительные исследования эоценовых и палеоценовых диатомитов Зауралья (на примере Камышловского месторождения и разреза Брусяна) // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 96–102.
11. Biostratigraphy of the marine paleogene in the West Siberian plate / M.A. Akhmetev et al. // Stratigraphy and Geological Correlation. – 2001. – V. 9. – № 2. – P. 132–158.
12. Late Paleocene-Early Eocene diatoms and dinocysts from biosiliceous facies of the middle Trans-Urals region / G.N. Aleksandrova, T.V. Oreshkina, A.I. Iakovleva, E.P. Radionova // Stratigraphy and Geological Correlation. – 2012. – V. 20. – № 4. – P. 380–404.
13. Сидоренков А.И., Зарубко Н.С., Самошин А.А. Модель механизма образования трепелов и опок // Критерии прогноза минерального сырья в приповерхностных образованиях севера Западной Сибири и Урала: труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень: Изд-во ЗапСибНИГНИ, 1989. – С. 46–63.
14. Беляев В.Н., Шеломенцев А.Г., Дорошенко С.В. Влияние освоения минерально-сырьевой базы на социально-экономическое развитие уральского региона // Вестник Челябинского государственного университета. – 2012. – № 24 (278). – С. 39–42.
15. Mineral deposits of the world (ores and some nonmetallics) / M. Kuzvart et al. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – 519 p.
16. Industrial Minerals and Their Uses / ed. by P.A. Ciullo. – New Jersey: Noyes Publication, 1996. – 443 p.
17. Аксенов В.В., Писаренко М.В., Шахлаев С.В. Управление качеством минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2015. – № 2. – С. 28–30.
18. Козловский Е.А. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике мира и России // Горный журнал. – 2015. – № 7. – С. 47–53.
19. Опал-кристаллитовые породы. Минеральное сырье / под ред. У.Г. Дистанова. – М.: Геоинформмарк, 1998. – 28 с.

20. The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences / ed. by J.P. Smol, E.F. Stoermer. Second Edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 667 p.
21. Miles W.J. Economics of diatomite // Proceeding National Western Mining Conference. – Denver: Colorado Mining Association, 1990. – P. 1–10.
22. Романов С.М., Алексеев Г.Ф. Комплексный подход к развитию минерально-сырьевой базы региона // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 1. – С. 270–278.

*Поступила 21.03.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Смирнов П.В.**, заместитель директора НОЦ «Геология нефти и газа» Тюменского индустриального университета; научный сотрудник Института Геологии и Палеонтологии Технического университета Клаусталь.

UDC 553.041; 553.69; 553.578

## PRELIMINARY RESULTS OF REVISION OF MINERAL-RAW MATERIAL BASE OF OPAL-CRISTOBALITE ROCKS IN MIDDLE TRANS-URALS

Pavel V. Smirnov,  
geolog.08@mail.ru

Tyumen Industrial University,  
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

**Relevance of the discussed issue.** Opal-cristobalite rocks in terms of their spatial distribution and their resource potential are one of the main types of nonmetallic minerals in the Trans-Urals and potentially industry-forming for region. Due to the absence of revision geological exploration work, the available estimates of the resource potential, being the only ones presented in the literature, are obviously very approximate, are irrelevant and require additions. Revision works, on the one hand, are aimed at increasing the reserves of opal-cristobalite rocks, on the other hand their aim is to differentiate the productive strata by age, lithology and raw material quality in such a vast territory. When clarifying the geographic structure, systematizing objects and assessing the raw potential of the Trans-Urals sub-province, not only deposits but also areas of near-surface deposition of siliceous deposits potentially promising for opal-cristobalite raw materials should be taken into account.

**The main aim** is the revision of the mineral base of opal-cristobalite rocks, identification of promising areas of prospecting works for all types of opal-cristobalite rocks in the Middle Trans-Urals.

**The methods used in the research:** field research, reconnaissance studies, sampling.

**The results.** Based on the study of stock geological literature, recommendations for thematic and geological survey, and field research on the study of natural and artificial outcrops of opal-cristobalite rocks, the author has identified the promising areas. The information on 12 promising sites on siliceous raw materials is updated, the information on four of them was introduced for the first time. The mineral-raw material base of opal-cristobalite rocks has huge prospects for increasing reserves, and the objects are located in areas with the developed transport and industrial infrastructure, which simplifies their industrial development and reduces the volume of capital expenditures.

### Key words:

Opal-cristobalite rocks, mineral raw material base, diatomite, opoka, tripolite, Trans-Urals.

The author expresses deep gratitude to the colleagues – I.I. Nesterov, A.O. Konstantinov and A.A. Novoselov (IUT, Tyumen) – for their aid in field studies, T.V. Oreshkina (GIN RAS, Moscow), N.I. Afanasyeva (TsNIGeolnerud, Kazan) – for valuable advice and discussion of the results, which were very useful for the research.

### REFERENCES

1. *Kremnistyye porody SSSR* [Siliceous rocks of the USSR]. Ed. by U.G. Distanov. Kazan, Tatarian Publ., 1976. 412 p.
2. Petrov V.P. *Syrevaaya baza kremnistykh porod SSSR i ikh ispolzovanie v narodnom khozyaystve* [Raw materials base of siliceous rocks of the USSR and their use in the national economy]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 104 p.
3. Global diatomite reserves by country 2016. *US Geological Survey*, 2017. Available at: <https://www.statista.com/statistics/264934/global-diatomite-reserves/> (accessed 18 March 2017).
4. Diatomite [Advance release]. *U.S. Geological Survey minerals yearbook*, 2011. Reston, USGS, 2011. 6 p.
5. Diatomite. *U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries*, 2008. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/250400.pdf> (accessed 18 March 2017).
6. Diatomite statistics. Historical statistics for mineral and material commodities in the United States. *U.S. Geological Survey Data Series 140*, 2014. Available at <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/> (accessed 16 March 2017).
7. Smirnov P.V. Prospects for expansion of mineral base of siliceous rocks in frontier zone of Tyumen and Sverdlovsk regions. *Georesources*, 2015, vol. 1, no. 4, pp. 81–84. In Rus.
8. Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Potential of siliceous resource of post-Eocene Middle Trans-Urals. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 115–123. In Rus.
9. Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Diatomaceous Clay of Shadrinsky deposit (Kurgan Region). *Georesources*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 240–244. DOI: 10.18599/grs.18.3.16 In Rus.
10. Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Comparative studies of Eocene and Paleocene diatomite from Trans-Urals (on the example of Kamyshlov deposit and section Brusyana). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 96–102. In Rus.
11. Akhmetev M.A., Aleksandrova G.N., Benyamovsky V.N., Zaporozhets N.I., Oreshkina T.V., Radionova E.P., Yakovleva A.I., Amon E.O., Vasileva O.N., Zhelezko V.I., Bugrova E.M., Glezner Z.I., Nikolaeva I.A., Panova L.A., Kozlova G.E., Strelnikova N.I. Biostratigraphy of the marine paleogene in the West Siberian plate. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2001, vol. 9, no. 2, pp. 132–158.
12. Aleksandrova G.N., Oreshkina T.V., Iakovleva A.I., Radionova E.P. Late Paleocene – Early Eocene diatoms and dinocysts from biosiliceous facies of the middle Trans-Urals region. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 380–404.
13. Sidorenkov A.I., Zarubko N.S., Samoshin A.A. Model mekhanizma obrazovaniya trepelov i opok [The model of tripolite and opoka formation mechanism]. *Kriterii prognoza mineralnogo syrya v pripoverkhnostnykh obrazovaniyakh severa Zapadnoy Sibiri i Urala. Trudy ZapSibNIGNI* [Criteria for forecasting mineral raw materials in the near-surface formations of the north of Western Siberia and the Urals]. Tyumen, 1989. pp. 46–63.
14. Belyaev V.N., Shelomentsev A.G., Doroshenko S.V. Vliyaniye osvoeniya mineralno-syrevoy bazy na sotsialno-ekonomicheskoe razvitiye uralskogo regiona [Influence of development of mineral resource base in the socio-economic development of the Ural region]. *Bulletin of Chelyabinsk State University*, 2012, no. 24 (278), pp. 39–42.



15. Kuzvart M., Misar Z., Patocka F., Pertold Z., Pouba Z., Vanecek M. Mineral deposits of the world (ores and some nonmetallics). Amsterdam, Elsevier, 1994. 519 p.
16. Ciullo P.A. *Industrial Minerals and Their Uses*. New Jersey, Noyes Publ., 1996. 443 p.
17. Aksenov V.V., Pisarenko M.V., Spaklein S.V. Quality management of mineral resources of solid minerals. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2015, no. 2, pp. 28–30. In Rus.
18. Kozlovskiy E.A. Mineralno-syrevye resursy v ekonomike mira i Rossii [Mineral resources in the world economy and in Russia]. *Eurasia Mining*, 2015, no. 7, pp. 47–53.
19. Distanov U.G. *Opal-kristobalitovye porody. Mineralnoe syre* [Opal-cristobalite rocks. Mineral raw material]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1998. 28 p.
20. *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. Second Edition. Eds. Smol J.P., E.F. Stoermer. Cambridge, Cambridge University Press, 2010. 667 p.
21. Miles W.J. Economics of diatomite. *Proceeding National Western Mining Conference*. Denver, Colorado Mining Association, 1990. pp. 1–10.
22. Romanov S.M., Alekseev G.F. Kompleksny podkhod k razvitiyu mineralno-syrevoy bazy regiona [Comprehensive approach to development of mineral and raw materials base of the region]. *Mining Information Analytical Bulletin*, 2011, no. 1, pp. 270–278.

Received: 21 March 2017.

#### Information about the authors

**Pavel V. Smirnov**, deputy director, Tyumen Industrial University.

УДК 543.05

## ОРПРЕДЕЛЕНИЕ АЛКАНОВ И АЛКИЛБЕНЗОЛОВ В ВОДНЫХ ОБРАЗЦАХ МЕТОДАМИ ТВЕРДОФАЗНОЙ МИКРОЭКСТРАКЦИИ И ГАЗО-ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИЕЙ

Рябов Андрей Юрьевич<sup>1</sup>,  
andrey@ipc.tsc.ru

Кудряшов Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
ks@ipc.tsc.ru

Очередько Андрей Николаевич<sup>1</sup>,  
andrew@ipc.tsc.ru

Великов Анатолий Алексеевич<sup>1</sup>,  
vel2@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью повышения эффективности методов пробоподготовки для определения микроколичеств углеводородов (алканов и алкилбензолов) в водных растворах.

**Целью работы** является изучение закономерностей выделения алканов и алкилбензолов из водных образцов с использованием твердофазной микроэкстракции и последующим газохроматографическим определением.

**Методы исследования:** газовая хроматография, хромато-масс-спектрометрия.

**Результаты.** Определение углеводородов в водных образцах осуществляется с помощью твердофазной микроэкстракции и центрифугирования. Методика пробоподготовки подразумевает применение специального картриджа для сорбции веществ из воды с сорбентом массой 2 мг. Экстракция углеводородов с него осуществляется растворителем объемом равным 5–10 мкл с помощью центрифуги.

Исследованы различные типы сорбентов (Porapak Q, Tenax TA, C<sub>18</sub> фирмы Supelco) и растворители (метанол, ацетон и четыреххлористый углерод) для экстракции углеводородов (алканов и алкилбензолов). Оптимальным соотношением сорбента и растворителя для экстракции веществ являются Tenax TA с ацетоном и Porapak Q с четыреххлористым углеродом. Показано влияние массы сорбента и объема растворителя на извлечение веществ и интенсивность аналитического сигнала. При изменении массы сорбента с 2 до 10 мг требуется увеличение объема экстрагента, что приводит к снижению интенсивности аналитического сигнала. На модельных растворах определен предел детектирования веществ для газохроматографического метода – он равен 0,3 мкг/л, при отношении сигнал/шум = 3.

Апробация методики осуществлена на примере анализа водного раствора, содержащего компоненты синтетического жидкого топлива, полученного в результате димеризации пропан-бутановой смеси в присутствии воды в плазмохимическом реакторе.

### Ключевые слова:

Твердофазная микроэкстракция, газо-жидкостная хроматография, водные растворы углеводородов, синтетическое жидкое топливо, барьерный разряд.

### Введение

Определение углеводородов в водных образцах с концентрацией на уровне мкг/л является сложной и трудоемкой задачей. Многочисленные способы пробоподготовки водных образцов можно разделить в основном на две группы – жидкофазная и твердофазная экстракция веществ. В последнее время основные исследования в этой области направлены на миниатюризацию метода с помощью микроэкстракции веществ. Этот подход значительно снижает расход токсичных растворителей, сокращает время пробоподготовки и позволяет работать с малыми объемами анализируемого объекта.

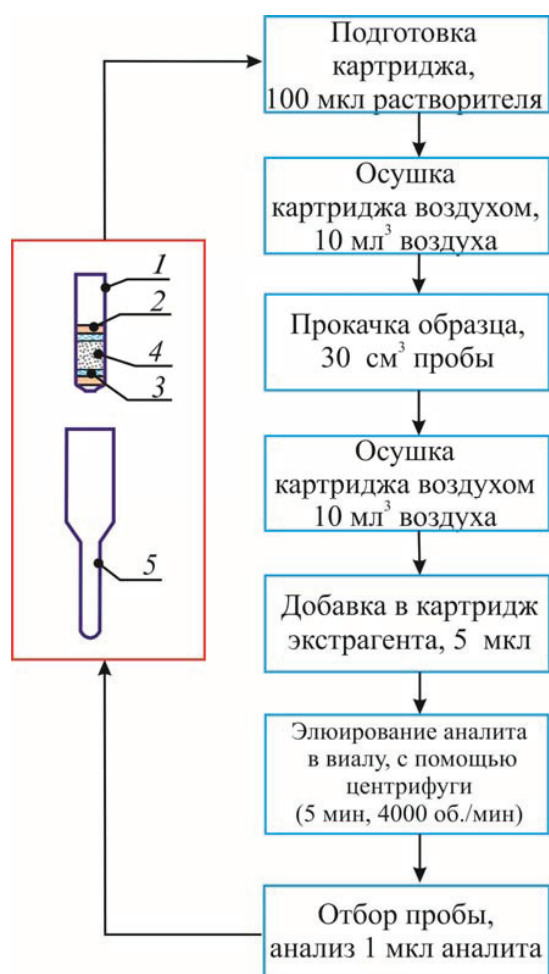
Одним из эффективных методов микроэкстракции веществ является твердофазная микроэкстракция (ТФМЭ) [1], получившая широкое распространение [2–10]. Основные исследования по ТФМЭ направлены на анализ сложных биологических веществ, или полициклических ароматиче-

ских углеводородов (ПАУ), например [11–19]. Работ, использующих данную методику пробоподготовки для анализа легких углеводородов (бензиновых углеводородов) в водных образцах, не достаточно [20–24]. Между тем нефть и продукты ее переработки (топливо) являются повышенным источником загрязнения почвы и водных ресурсов.

В настоящей работе предложен оригинальный подход для твердофазной микроэкстракции с помощью центрифуги. Использование центрифуги и центробежной силы для отделения экстрагента позволяет сократить объем растворителя для экстракции до 5 мкл и, соответственно, исключить этап концентрирования пробы, и увеличить содержание анализируемых веществ в анализе. Для этого изготовлен специальный картридж с сорбентом массой равной 2 мг, представляющий отдельное сменное устройство как для прокачивания через него водного образца, так и для элюирования с него веществ растворителем в центрифуге.

### Экспериментальная часть

Конструкция картриджа и методика пробоподготовки водных образцов приведена на рис. 1. Корпус картриджа изготовлен из прозрачной тefлоновой трубки – 1 длиной 30 мм и внутренним диаметром равным 2 мм. Нижняя часть ее заужена, внутри последовательно расположены слои металлической сетки – 2, стеклянной ваты – 3 и сорбента – 4 массой равной 2 мг. Микровиала – 5 изготовлена из тefлона и имеет вытянутую нижнюю часть для сбора аналита при центрифугировании.



**Рис. 1.** Схема пробоподготовки водных образцов и устройство картриджа для твердофазной микроэкстракции при помощи центрифуги: 1 – тefлоновая трубка картриджа; 2 – металлическая сетка; 3 – стеклянная вата; 4 – сорбент; 5 – микровиала

**Fig. 1.** Scheme of water sample preparation and design of the cartridge for solid phase microextraction using a centrifuge: 1 is the teflon tube; 2 is the metallic mesh; 3 is the glass wool; 4 is the sorbent; 5 is the micro-vial

Центрифуга позволяет использовать для экстракции веществ микроколичество растворителя (5 мкл для сорбента массой 2 мг). Такого объема хватает только для смачивания сорбента, и в этом случае отделение растворителя вместе с растворенными веществами невозможно осуществить другими методами. Способ основан на использовании од-

ного и того же растворителя как для подготовки картриджа (его отмывки), так и для экстракции сорбированных веществ. После центрифугирования собранный объем аналита составляет ~1,5 мкл. Продолжительность пробоподготовки водного образца 20–30 минут. После первого использования картриджа его можно применять повторно без дополнительных процедур подготовки.

В качестве модельных углеводородов использовали: н-нонан, н-декан, н-ундекан, н-додекан, пропилбензол, кумол, мезитилен, изобутилбензол, третбутилбензол и вторбутилбензол качества не ниже ч.д.а. Для экстракции веществ применялись растворители – ацетон, метанол, четыреххлористый углерод качества ч.д.а., без дополнительной очистки. Изготовленные картриджи содержали сорбенты Porapak Q (80/100 mesh), Tenax TA (80/100 mesh) и C<sub>18</sub> фирмы Supelco.

Все исследования выполнены на модельных растворах с концентрацией веществ в диапазоне от 3·10<sup>-4</sup> до 0,1 мг/л. Модельные растворы (пробы) готовили разбавлением водой исходного раствора ацетона, содержащего растворенные вещества с концентрацией каждого 1000 мг/л. Растворы готовили непосредственно перед измерениями и перемешивали в течение 60 мин с помощью магнитной мешалки.

Растворитель, содержащий сорбированные вещества (аналит), отделяли от сорбента в центрифуге СМ-12 (Россия) при частоте вращения 4000 об/мин в течение 5 мин. Аналит анализировали на хроматографе НР 6890 с пламенно-ионизационным детектором на капиллярной колонке НР-1 длиной 30 м, диаметром 0,53 мм и толщиной неподвижной фазы 5 мкм, в режиме программируемой температуры.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлена гистограмма аналитического сигнала веществ для разных растворителей и сорбентов. Приведены значения для пропилбензола и н-додекана, результаты для других ароматических или алифатических углеводородов сравнимы. Исследования выполнены на модельных растворах с концентрацией веществ 0,01 мг/л.

Применение метанола в данных условиях показывает наименьший отклик аналитического сигнала, повторная экстракция другим растворителем (четырёххлористым углеродом) приводит к появлению сигнала, что предполагает слабую экстракционную способность метанола в данных условиях.

Низкая интенсивность аналитического сигнала при использовании сорбента С<sub>18</sub> с различными растворителями ожидаема, поскольку применение данного материала в ТФМЭ, как правило, ориентировано на вещества с большей молекулярной массой, например [14, 16, 17].

Для дальнейших исследований выбраны сорбенты Tenax TA с ацетоном в качестве растворителя и Porapak Q с четыреххлористым углеродом. На рис. 3 представлены зависимости аналитического

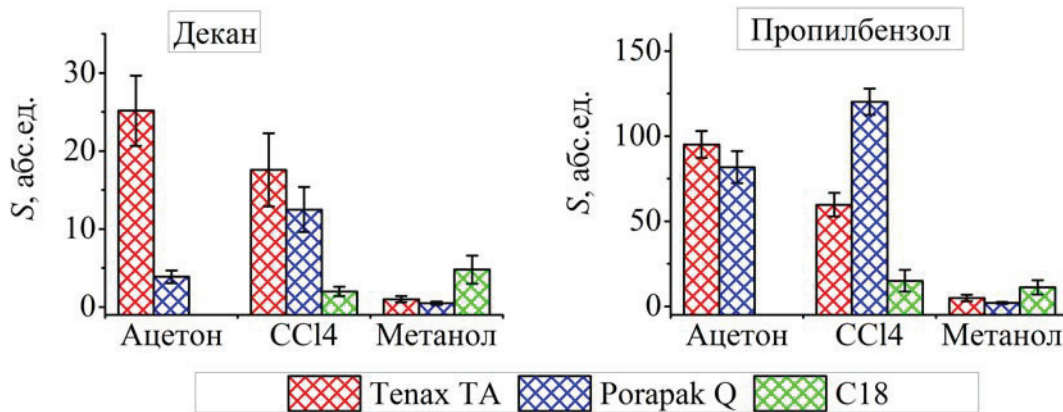


Рис. 2. Площадь аналитического сигнала ( $S$ ) пропилбензола и  $n$ -додекана в зависимости от растворителя и сорбента. Модельный раствор с концентрацией веществ  $0,01$  мг/л

Fig. 2. Area of analytical signal ( $S$ ) for propylbenzene and  $n$ -dodecane versus solvent or sorbent used. The impurity concentration in the model solution is  $0,01$  mg/l

сигнала от концентрации исходного раствора при экстракции веществ с данных сорбентов. Видно, что предлагаемый способ пробоподготовки водных образцов позволяет определять углеводороды в большом диапазоне концентраций. Относительное стандартное отклонение находится в интервале значений от  $0,034$  до  $0,42$  при количестве повторений измерений равном  $3-5$  раз и увеличивается с уменьшением концентрации веществ в растворе.

Пределом детектирования для газохроматографического метода является отношение интенсивностей сигнала вещества к шуму нулевой линии (Limits of detection – LOD), которое соответствует минимальному значению, равному  $3$ .

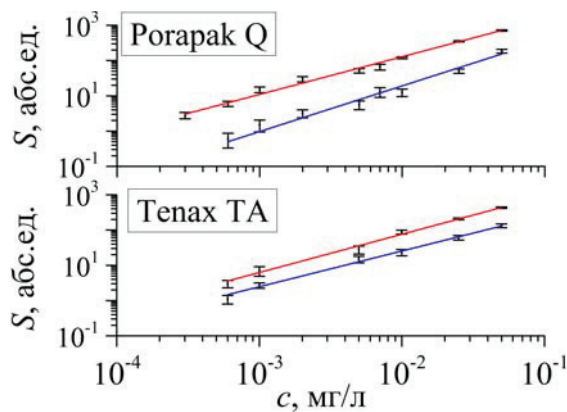


Рис. 3. Зависимость площади ( $S$ ) под хроматографическими кривыми для сорбентов Порapak Q и Тенакс ТА от концентрации ( $c$ ) пропилбензола (красные линии) и  $n$ -додекана (синие линии) в исходном растворе

Fig. 3. Area ( $S$ ) under chromatographic curves for Porapak Q and Tenax TA versus concentration of propylbenzene (red lines) and  $n$ -dodecane (blue lines) in initial solution

На рис. 4 представлены хроматограммы аналитов модельного раствора с концентрацией веществ  $0,001$  мг/л и контрольного раствора. Контрольный эксперимент представляет собой контрольно-проверочную процедуру пробоподготовки по предлагаемой методике, только вместо модельного ра-

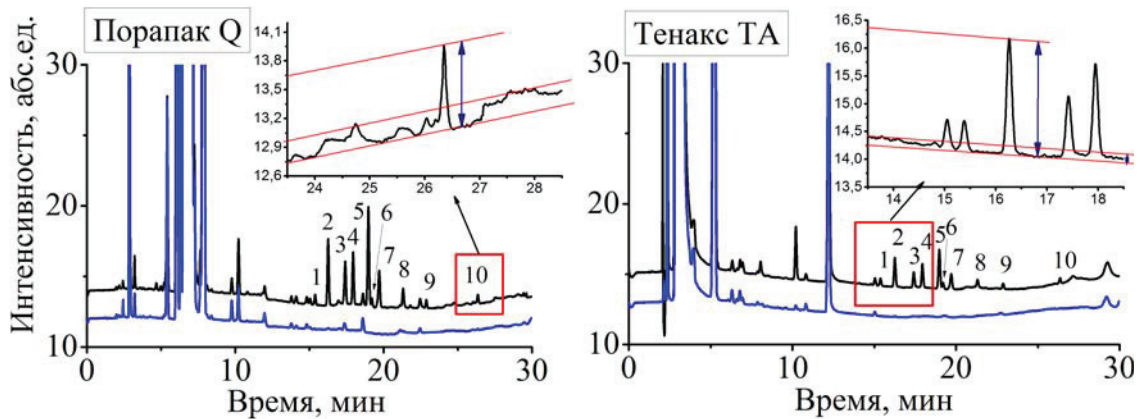
створа используется дистиллированная вода, и выполняется как до, так и после эксперимента с модельным раствором. Наилучшим результатом является значение LOD для пропилбензола равное  $0,3$  мкг/л, полученное с помощью картриджа с сорбентом Порapak Q. Полученные значения LOD сравнимы с уровнем значений LOD для разных веществ, например [11, 14–17].

Из рис. 4 видно, что для алифатических соединений наблюдается достаточно низкая интенсивность сигнала по сравнению с сигналами для ароматических углеводородов. Данное отличие связано с природой сорбентов, содержащих ароматические кольца. Мономером для материала Тенакс ТА является  $2,6$ -дифенил- $n$ -фениленоксид, а для Порapak Q – дивинилбензол/этилвинилбензол. Различаются сорбенты и по удельной площади поверхности ( $35$  и  $500-600$  м<sup>2</sup>/г для Тенакс и Порapak соответственно), что объясняет различие в интенсивности сигнала.

Использование микроколичеств растворителя для экстракции сорбированных веществ с сорбента (в предлагаемой методике пробоподготовки объем растворителя составляет  $5$  мкл для сорбента массой  $2$  мг) позволяет только смочить сорбент. Отделение данного количества растворителя вместе с сорбированными веществами возможно только центрифугированием. Соотношение массы сорбента и объема растворителя представляет значительный интерес, поскольку малая масса сорбента позволяет уменьшить объем растворителя и увеличить концентрацию анализируемых веществ в анализе, тем самым повысить интенсивность аналитического сигнала.

Для исследования было изготовлено  $3$  типа картриджей с массой сорбента  $2$ ;  $5$  и  $10$  мг, минимальный объем растворителя для них составлял  $5$ ;  $10$  и  $15$  мкл, соответственно. Минимальный объем растворителя для элюирования веществ подбирался таким образом, чтобы при его центрифугировании в микровiale собираемый объем аналита составлял минимальное количество, около  $1,5$  мкл.

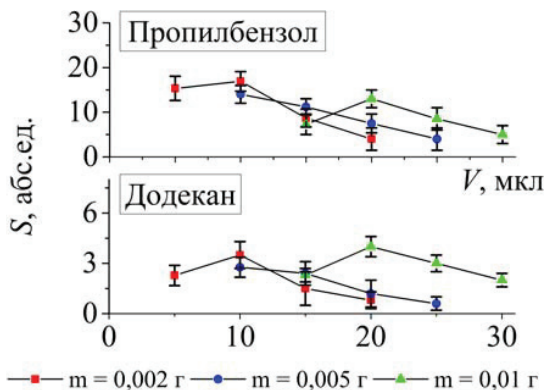




**Рис. 4.** Хроматограммы аналитов контрольного (синие линии) и модельного растворов с концентрацией веществ 0,001 мг/л на сорбентах Porapak Q и Tenax TA (черные линии): 1 – n-нонан, 2 – пропилбензол, 3 – кумол, 4 – мезитилен, 5 – изобутилбензол, 6 – n-декан, 7 – третбутилбензол, 8 – вторбутилбензол, 9 – n-ундекан, 10 – n-додекан

**Fig. 4.** Chromatograms of analytes of blank (blue lines) and model solutions with concentration of the substances of 0,001 mg/l on Porapak Q and Tenax TA (black lines) sorbents: 1 – n-nonane, 2 – propylbenzene, 3 – cumene, 4 – mesitylene, 5 – isobutylbenzene, 6 – n-decane, 7 – tert-butylbenzene, 8 – sec-butylbenzene, 9 – n-undecane, 10 – n-dodecane

На рис. 5 представлены результаты зависимостей аналитического сигнала от массы сорбента и объема растворителя. Видно, что на начальном этапе увеличение количества элюента приводит к повышению интенсивности сигнала, дальнейшее увеличение объема растворителя только понижает аналитический сигнал для всех картриджей. Уменьшение площади аналитического сигнала возможно связано с достижением максимальной эффективности экстракции веществ и последующим разбавлением аналита экстрагентом.



**Рис. 5.** Зависимость площади аналитического сигнала ( $S$ ) для пропилбензола и n-додекана от массы сорбента и объема растворителя. Модельный раствор с концентрацией веществ 0,001 мг/л

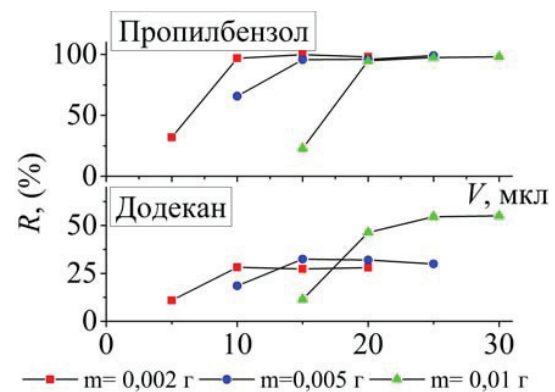
**Fig. 5.** Area of the analytic signals ( $S$ ) from propylbenzene and n-dodecane vs sorbent mass and solvent volume. The concentration of substances in the model solution is 0,001 mg/l

Характеристикой эффективности экстракции веществ с сорбента является процентное извлечение веществ ( $R$ ) из водного раствора, определяемое по формуле:

$$R = \frac{C_{\text{аналита}} \times V_{\text{аналита}}}{C_{\text{раствора}} \times V_{\text{раствора}}} \times 100 \%,$$

где  $C_{\text{аналита}}$  – концентрация вещества в анализе (мг/л);  $V_{\text{аналита}}$  – объем аналита (л), полученный по методике после экстракции;  $C_{\text{раствора}}$  – концентрация вещества в пробе модельного раствора (мг/л);  $V_{\text{раствора}}$  – объем модельного раствора (л), прокаченного через картридж с сорбентом.

Для расчетов использовался модельный раствор с концентрацией веществ 0,001 мг/л, объем прокаченный через картридж составлял 30 мл, а объем аналита после экстракции равнялся 1,5 мкл. Концентрацию веществ в анализе ( $C_{\text{аналита}}$ ) определяли по концентрационной зависимости (рис. 3), которая предварительно была получена для тех же веществ и в схожих условиях.



**Рис. 6.** Процентное извлечение веществ ( $R$ ) пропилбензола и n-додекана в зависимости от объема растворителя и массы сорбента. Модельный раствор с концентрацией веществ 0,001 мг/л

**Fig. 6.** Percentage yield of the extracted ( $R$ ) propylbenzene and n-dodecane vs solvent volume and sorbent mass. The concentration of substances in the model solution is 0,001 mg/l

Расчеты показывают (рис. 6), что в приведенных ранее результатах процент извлечения веществ ( $R$ ) имеет низкое значение и с увеличением объема растворителя значительно повышается, до-

стигая максимальных величин ~98 % для ароматических соединений и ~50 % для алканов. Дальнейшее увеличение объема растворителя только разбавляет аналит, приводя к уменьшению аналитического сигнала. Так, в случае использования картриджа с массой сорбента 2 мг объем растворителя для экстракции составлял 5; 10; 15 и 20 мкл, после центрифугирования объем собираемого аналита соответствовал 1,5; 5,5; 11 и 15,5 мкл.

Разработанный метод пробоподготовки водных образцов с помощью твердофазной микроэкстракции и центрифугирования предлагает простой и быстрый способ определения микроколичеств углеводородов в воде. Апробация данной методики осуществлена на примере анализа водного раствора, содержащего компоненты синтетического жидкого топлива (СЖТ). СЖТ получено в результате димеризации пропан-бутановой смеси в присутствии воды в плазмохимическом реакторе по методике [25]. Анализ такой смеси представляет сложную аналитическую задачу.

Методика пробоподготовки водного образца выполнена с применением картриджа с сорбентом Tenax TA массой 2 мг и растворителя – ацетона объемом 10 мкл. Объем пробы, прокачанной через картридж, составил 3 мл, аналита после центрифугирования – 5,5 мкл.

Определение количественного содержания компонентов СЖТ в водном растворе предполагает построение калибровочной кривой с учетом предложенной методики пробоподготовки. На рис. 7 приведены калибровочные кривые и соответствующие функции для модельных углеводородов – n-гептана и n-декана. Результаты для других исследованных углеводородов сравнимы, не смотря на значительное различие их растворимости в воде.

На рис. 8 представлена хроматограмма микроэкстракта СЖТ и массовое распределение углеводородов в нем, рассчитанное с использованием данных рис. 7.

Идентификация компонентов микроэкстракта выполнена с применением хромато-масс-спектрометра Thermo Scientific DFS. В составе микроэкстрактов идентифицированы алканы C<sub>6</sub>–C<sub>12</sub>, преимуще-

ственно изомерного строения, наибольшее содержание компонентов СЖТ приходится на алканы C<sub>7</sub>–C<sub>9</sub>.

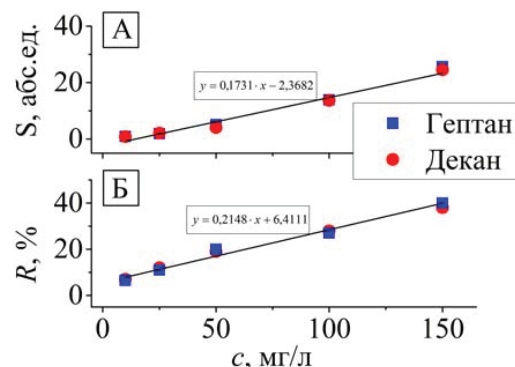


Рис. 7. Зависимость площади аналитического сигнала (А) и процента извлечения веществ (Б) от концентрации углеводородов в воде. Картридж диаметром 2 мм, сорбент – Tenax TA массой 2 мг, объем растворителя 10 мкл, время центрифугирования 5 мин при 4000 об/мин

Fig. 7. Area of analytical signal (A) and percentage of substance (B) yield vs concentration of hydrocarbons in water. Cartridge diameter is 2 mm, mass of Tenax TA sorbent is 2 mg, solvent volume is 10 µl, and time of centrifugation is 5 min at 4000 rev/min

#### Заключение

Предложен оригинальный подход к пробоподготовке водных объектов с помощью твердофазной микроэкстракции и центрифугирования. Его использование позволяет определять микроколичества углеводородов в воде простым и эффективным способом, для газохроматографического метода предел детектирования вещества составляет 0,3 мкг/л. Оптимальными параметрами для картриджа являются сочетание массы сорбента и растворителя как 2 мг массы сорбента и 10 мкл растворителя, соответственно.

Апробация методики осуществлена на примере анализа водного раствора, содержащего компоненты СЖТ, полученного в результате димеризации пропан-бутановой смеси в присутствии воды в плазмохимическом реакторе.

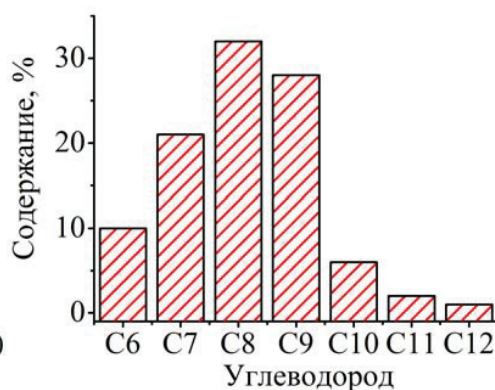
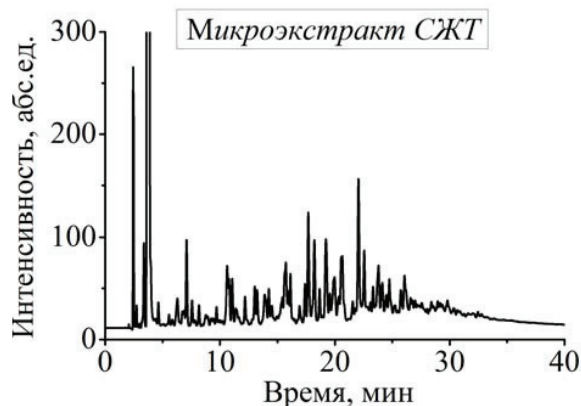


Рис. 8. Хроматограмма микроэкстракта СЖТ, а также массовое распределение углеводородов в нем

Fig. 8. Chromatogram of synthetic liquid fuel microextraction and mass distribution of hydrocarbons in it

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Piri-Moghadam H., Ahmadi F., Pawliszyn J. A critical review of solid phase microextraction for analysis of water samples // Trends in Analytical Chemistry. – 2016. – V. 85. – P. A. – P. 133–143.
2. New developments in microextraction techniques in bioanalysis. A review / J.A. Ocana-Gonzalez, R. Fernandez-Torres, M.A. Bello-Lopez, M. Ramos-Payan // Analytica Chimica Acta. – 2016. – V. 905. – P. 8–23.
3. Yang C., Wang J., Li D.-H. Microextraction techniques for the determination of volatile and semivolatile organic compounds from plants: a review // Analytica Chimica Acta. – 2013. – V. 799. – P. 8–22.
4. Mehdinia A., Aziz-Zanjani M.O. Advances for sensitive, rapid and selective extraction in different configurations of solid-phase microextraction // Trends in Analytical Chemistry. – 2013. – V. 51. – P. 13–22.
5. Использование твердофазной микроэкстракции при исследовании амфетамина, героина и кокаина / В.Ю. Кузовлев, А.В. Полосин, Ю.А. Субботин, А.А. Овчинникова // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Т. 29. – № 9. – С. 26–27.
6. Applications of solid phase microextraction in food analysis / C.-H. Xu, G.-S. Chen, Z.-H. Xiong, Y.-X. Fan, X.-C. Wang, Y. Liu // Trends in Analytical Chemistry. – 2016. – V. 80. – P. 12–29.
7. Recent developments and future trends in solid phase microextraction techniques towards green analytical chemistry / A. Spieletun, L. Marcinkowski, M. de la Guardia, J. Namiesnik // Journal of Chromatography A. – 2013. – V. 1321. – P. 1–13.
8. Perspectives and challenges of on-site quantification of organic pollutants in soils using solid-phase microextraction / B. Kenesov, J.A. Koziel, N.V. Bakaikina, D. Orazbayeva // Trends in Analytical Chemistry. – 2016. – V. 85. – P. A. – P. 111–122.
9. Determination of steroid hormones in biological and environmental samples using green microextraction techniques: an overview / J. Aufartova, C. Mahugo-Santana, Z. Sosa-Ferrera, et al. // Analytica Chimica Acta. – 2011. – V. 704. – P. 33–46.
10. Silva E.A.S., Risticic S., Pawliszyn J. Recent trends in SPME concerning sorbent materials, configurations and in vivo applications // Trends in Analytical Chemistry. – 2013. – V. 43. – P. 24–36.
11. Chary N.S., Fernandez-Alba A.R. Determination of volatile organic compounds in drinking and environmental waters // Trends in Analytical Chemistry. – 2012. – V. 32. – P. 60–75.
12. A novel and cost-effective method for the determination of fifteen polycyclic aromatic hydrocarbons in low volume rainwater samples / M. Fernandez-Amado, M.C. Prieto-Blanco, P. Lopez-Mahia, S. Muniategui-Lorenzo, D. Prada-Rodriguez // Talanta. – 2016. – V. 155. – P. 175–184.
13. Савельева Е.И., Гаврилова О.П., Гагкаева Т.Ю. Исследование состава летучих органических соединений, выделяемых микроскопическим грибом *Fusarium Culmorum*, методом газовой хромато-масспектрометрии в сочетании с твердофазной микроэкстракцией // Экологическая химия. – 2014. – Т. 23. – № 2. – С. 110–118.
14. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in water samples using online microextraction by packed sorbent coupled with gas chromatography–mass spectrometry / S. Fu, J. Fan, Y. Hashi, Z. Chen // Talanta. – 2012. – V. 94. – P. 152–157.
15. Comparative evaluation of liquid–liquid extraction, solid-phase extraction and solid-phase microextraction for the gas chromatography–mass spectrometry determination of multiclass priority organic contaminants in wastewater / J. Robles-Molina et al., B. Gilbert-Lopez, J.F. Garcia-Reyes, A. Molina-Diaz // Talanta. – 2013. – V. 117. – P. 382–391.
16. Prieto A., Schrader S., Moeder M. Determination of organic priority pollutants and emerging compounds in wastewater and snow samples using multiresidue protocols on the basis of microextraction by packed sorbents coupled to large volume injection gas chromatography–mass spectrometry analysis // Journal of Chromatography A. – 2010. – V. 1217. – P. 6002–6011.
17. Mendes B., Goncalves J., Camara J.S. Effectiveness of high-throughput miniaturized sorbent- and solid phase microextraction techniques combined with gas chromatography–mass spectrometry analysis for a rapid screening of volatile and semi-volatile composition of wines-A comparative study // Talanta. – 2012. – V. 88. – P. 79–94.
18. Abdel-Rehim M. Microextraction by packed sorbent (MEPS): a tutorial // Analytica Chimica Acta. – 2011. – V. 701. – P. 119–128.
19. Большаков Д.С., Амелин В.Г., Никешина Т.Б. Определение пестицидов в природных водах методом мицеллярной электрокинетической хроматографии после микроэкстракционного концентрирования // Труды федерального охранного центра охраны здоровья животных. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 199–214.
20. Tankiewicz M., Morrison C., Biziuk M. Application and optimization of headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography–flame-ionization detector (GC-FID) to determine products of the petroleum industry in aqueous samples // Microchemical Journal. – 2013. – V. 108. – P. 117–123.
21. Минаков Д., Гринштейн И., Семенов П. Хроматографический анализ углеводородов в морских донных отложениях // Аналитика. – 2014. – № 2. – С. 44–49.
22. Optimization of headspace single-drop microextraction technique for extraction of light hydrocarbons (C<sub>6</sub>–C<sub>8</sub>) and its potential applications / C.C. Fang, Y.-Q. Xiong, Q.-Y. Liang, Y. Li, P. Peng // Organic Geochemistry. – 2011. – V. 42. – P. 316–322.
23. Simultaneous determination of polycyclic aromatic hydrocarbons and benzene, toluene, ethylbenzene and xylene in water samples using a new sampling strategy combining different extraction modes and temperatures in a single extraction solid-phase microextraction-gas chromatography–mass spectrometry procedure / J.N. Bianchin, G. Nardini, J. Merib, A.N. Dias, E. Martendal, E. Carasek // Journal of Chromatography A. – 2012. – V. 1233. – P. 22–29.
24. Study of the influence of temperature and precipitations on the levels of BTEX in natural waters / Y. Moliner-Martinez, R. Herrera-Hernandez, J. Verdu-Andres, P. Campins-Falco, C. Garrido-Palanca, C. Molins-Legua, A. Seco // Journal of Hazardous Materials. – 2013. – V. 263. – P. 131–138.
25. Kudryashov S., Ryabov A., Shechyogoleva G. A new approach to the non-oxidative conversion of gaseous alkanes in a barrier discharge and features of the reaction mechanism // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2015. – V. 49. – P. 025205.

Поступила 06.03.2017 г.

## Информация об авторах

**Рябов А.Ю.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Кудряшов С.В.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Очередыко А.Н.**, младший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Великов А.А.**, кандидат химических наук, научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.



UDC 543.05

## DETERMINATION OF ALKANES AND ALKYL BENZENES IN WATER SAMPLES USING SOLID-PHASE MICROEXTRACTION AND FOLLOWING GAS-LIQUID CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS

Andrey Yu. Ryabov<sup>1</sup>,

andrey@ipc.tsc.ru

Sergey V. Kudryashov<sup>1</sup>,

ks@ipc.tsc.ru

Andrey N. Ocheredko<sup>1</sup>,

andrew@ipc.tsc.ru

Anatoly A. Velikov<sup>1</sup>,

vel2@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Chemistry Siberian branch of the Russian academy of sciences, 4, Academicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

**Relevance** of the research is caused by the need to improve the efficiency of sample preparation methods for determining trace amounts of hydrocarbons (alkanes and alkyl benzenes) in aqueous solutions.

**The aim** of the work is to determine regularities of separation of alkanes and alkylbenzenes from water samples using solid-phase microextraction and testing the proposed methods.

**Methods of analysis:** gas chromatography, gas chromatography-mass spectrometry.

**Results.** Hydrocarbons in water samples are identified via solid phase microextraction and centrifugation. The sample preparation technique involves the use of special cartridge for adsorption of substances from water with 2 mg of sorbent. The hydrocarbons are extracted from the sorbent with 5–10 µl of solvent using a centrifuge.

In order to extract hydrocarbons (alkanes and alkylbenzenes) various types of sorbents (Porapak Q, Tenax TA, and C<sub>18</sub> sorbent from Supelco Co.) and solvents (methanol, acetone, and carbon tetrachloride) are used. Using Tenax TA with acetone and Porapak Q with carbon tetrachloride is optimal for microextraction. The influence of sorbent mass and solvent volume on extraction of substances and the intensity of analytical signal is shown. Increase of sorbent mass from 2 to 10 mg leads to lowering the intensity of analytic signal. The model solutions were used for determining the limit of substance detection for gas chromatography (0,3 µg/l at a signal-to-noise ratio of 3).

The method was tested on the example of analysis of aqueous solution containing components of synthetic liquid fuel, obtained by dimerization of propane-butane mixture with water in a plasma chemical reactor.

### Key words:

Solid-phase microextraction, gas-liquid chromatography, aqueous solutions of hydrocarbons, synthetic liquid fuel, barrier discharge.

### REFERENCES

- Piri-Moghadam H., Ahmadi F., Pawliszyn J. A critical review of solid phase microextraction for analysis of water samples. *Trends in Analytical Chemistry*, 2016, vol. 85, P. A, pp. 133–143.
- Ocana-Gonzalez J.A., Fernandez-Torres R., Bello-Lopez M.A., Ramos-Payan M. New developments in microextraction techniques in bioanalysis. A review. *Analytica Chimica Acta*, 2016, vol. 905, pp. 8–23.
- Yang C., Wang J., Li D.-H. Microextraction techniques for the determination of volatile and semivolatile organic compounds from plants: a review. *Analytica Chimica Acta*, 2013, vol. 799, pp. 8–22.
- Mehdinia A., Aziz-Zanjani M.O. Advances for sensitive, rapid and selective extraction in different configurations of solid-phase microextraction. *Trends in Analytical Chemistry*, 2013, vol. 51, pp. 13–22.
- Kuzovlev V.Yu., Polosin A.V., Subbotin Yu.A., Ovchinnikov A.A. Ispolzovanie tverdogfaznoy mikroekstraksii pri issledovanii amfetamina, geroina i kokaina [Use of solid-phase microextraction in study of amphetamine, heroin and cocaine]. *Journal Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2015, vol. 29, no. 9, pp. 26–27.
- Xu C.-H., Chen G.-S., Xiong Z.-H., Fan Y.-X., Wang X.-C., Liu Y. Applications of solid phase microextraction in food analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 2016, vol. 80, pp. 12–29.
- Spietelun A., Marcinkowski L., de la Guardia M., Namiesnik J. Recent developments and future trends in solid phase microextraction techniques towards green analytical chemistry. *Journal of Chromatography A*, 2013, vol. 1321, pp. 1–13.
- Kenessov B., Koziel J.A., Bakaikina N.V., Orazbayeva D. Perspectives and challenges of on-site quantification of organic pollutants in soils using solid-phase microextraction. *Trends in Analytical Chemistry*, 2016, vol. 85, P. A, pp. 111–122.
- Aufartova J., Mahugo-Santana C., Sosa-Ferrera Z. Determination of steroid hormones in biological and environmental samples using green microextraction techniques: An overview. *Analytica Chimica Acta*, 2011, vol. 704, pp. 33–46.
- Silva E.A.S., Risticovic S., Pawliszyn J. Recent trends in SPME concerning sorbent materials, configurations and in vivo applications. *Trends in Analytical Chemistry*, 2013, vol. 43, pp. 24–36.
- Chary N.S., Fernandez-Alba A.R. Determination of volatile organic compounds in drinking and environmental waters. *Trends in Analytical Chemistry*, 2012, vol. 32, pp. 60–75.
- Fernandez-Amado M., Prieto-Blanco M.C., Lopez-Mahia P., Munategui-Lorenzo S., Prada-Rodriguez D. A novel and cost-effective method for the determination of fifteen polycyclic aromatic hydrocarbons in low volume rainwater samples. *Talanta*, 2016, vol. 155, pp. 175–184.
- Savelyeva E.I., Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu. Issledovanie sostava letuchikh organicheskikh soedineniy, vydelyaemykh mikro-



- skopicheskim gribom *Fusarium Culmorum*, metodom gazovoy khromate-masspektroskopii v sochetanii s tverdogaznoy mikroekstraktsiyey [Investigation of composition of volatile organic compounds emitted by microscopic *Fusarium Culmorum* fungi by gas chromatography-mass spectroscopy in combination with solid-phase microextraction]. *Ecological Chemistry*, 2014, vol. 23, no. 2, pp. 110–118.
14. Fu S., Fan J., Hashi Y., Chen Z. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in water samples using online microextraction by packed sorbent coupled with gas chromatography-mass spectrometry. *Talanta*, 2012, vol. 94, pp. 152–157.
  15. Robles-Molinaetal J., Gilbert-Lopez B., Garcia-Reyes J.F., Molina-Diaz A. Comparative evaluation of liquid-liquid extraction, solid-phase extraction and solid-phase microextraction for the gas chromatography-mass spectrometry determination of multiclass priority organic contaminants in wastewater. *Talanta*, 2013, vol. 117, pp. 382–391.
  16. Prieto A., Schrader S., Moeder M. Determination of organic priority pollutants and emerging compounds in wastewater and snow samples using multiresidue protocols on the basis of microextraction by packed sorbents coupled to large volume injection gas chromatography-mass spectrometry analysis. *Journal of Chromatography A*, 2010, vol. 1217, pp. 6002–6011.
  17. Mendes B., Goncalves J., Camara J.S. Effectiveness of high-throughput miniaturized sorbent- and solid phase microextraction techniques combined with gas chromatography-mass spectrometry analysis for a rapid screening of volatile and semi-volatile composition of wines-A comparative study. *Talanta*, 2012, vol. 88, pp. 79–94.
  18. Abdel-Rehim M. Microextraction by packed sorbent (MEPS): a tutorial. *Analytica Chimica Acta*, 2011, vol. 701, pp. 119–128.
  19. Bolshakov D.S., Amelin V.G., Nikeshina T.B. Opredelenie polynnykh pestitsidov v prirodnykh vodakh metodom mitsellyarnoy elektrokineticheskoy khromatografii posle mikroekstraktsionnogo kontsentrirovaniya [Identification of polar pesticides in natural waters by micellar electrokinetic chromatography after microextraction concentration]. *Proceedings of the Federal Center for Animal Health*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 199–214.
  20. Tankiewicz M., Morrison C., Bizziuk M. Application and optimization of headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography-flame-ionization detector (GC-FID) to determine products of the petroleum industry in aqueous samples. *Microchemical Journal*, 2013, vol. 108, pp. 117–123.
  21. Minakov D., Greenstein I., Semenov A.P. Khromatograficheskiy analiz uglevodorodov v morskikh donnykh otlozheniyakh [Chromatographic analysis of hydrocarbons in marine sediments]. *Analytics*, 2014, no. 2, pp. 44–49.
  22. Fang C.C., Xiong Y.-Q., Liang Q.-Y., Li Y., Peng P. Optimization of headspace single-drop microextraction technique for extraction of light hydrocarbons (C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub>) and its potential applications. *Organic Geochemistry*, 2011, vol. 42, pp. 316–322.
  23. Bianchin J.N., Nardini G., Merib J., Dias A.N., Martendal E., Carasek E. Simultaneous determination of polycyclic aromatic hydrocarbons and benzene, toluene, ethylbenzene and xylene in water samples using a new sampling strategy combining different extraction modes and temperatures in a single extraction solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry procedure. *Journal of Chromatography A*, 2012, vol. 1233, pp. 22–29.
  24. Moliner-Martinez Y., Herraes-Hernandez R., Verdu-Andres J., Campins-Falco P., Garrido-Palanca C., Molins-Legua C., Seco A. Study of the influence of temperature and precipitations on the levels of BTEX in natural waters. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, vol. 263, pp. 131–138.
  25. Kudryashov S., Ryabov A., Shchyogoleva G. A new approach to the non-oxidative conversion of gaseous alkanes in a barrier discharge and features of the reaction mechanism. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 49, pp. 025205.

Received: 6 March 2017.

#### Information about the authors

**Andrey Yu. Ryabov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry Siberian branch of the Russian academy of sciences.

**Sergey V. Kudryashov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry Siberian branch of the Russian academy of sciences.

**Andrey N. Ocheredko**, junior researcher Institute of Petroleum Chemistry Siberian branch of the Russian academy of sciences.

**Anatoly A. Velikov**, Cand. Sc., researcher, Institute of Petroleum Chemistry Siberian branch of the Russian academy of sciences.

УДК 549.74

## НАТЁЧНЫЕ КАРБОНАТНЫЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ НАБЕРЕЖНОЙ р. ТУРЫ: УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ, ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ИНДИКАЦИОННОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Новоселов Андрей Андреевич,

mr.andreygeo@mail.ru

Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

**Актуальность.** Изучение процессов техногенного минералообразования является одним из динамично развивающихся направлений минералогии и геоэкологии. В настоящее время происходит постоянное увеличение числа исследований, посвященных минеральному составу образований в различных природно-антропогенных средах и технологических системах: атмосферных пылеаэрозолей, солевых отложений вод и накипей теплообменной аппаратуры и т. д. Образование натёчных форм кальцита (сталактитов, сталагмитов и карбонатных кор) на поверхности различных инженерных сооружений вследствие выщелачивания карбонатов цементного камня и их последующего переотложения является одним из наиболее распространенных видов техногенного минерагенеза. В современной литературе для обозначения подобных образований используется термин «техногенные спелеотермы». Процесс образования техногенных спелеотерм представляет интерес не только как источник информации о возможных скоростях и условиях аутигенного минералообразования, но и как потенциальный индикатор условий функционирования конкретного инженерного сооружения. Кроме того, проявления техногенного минерагенеза могут использоваться для оценки качества проведенных строительных работ и использованных строительных материалов.

**Цель работы:** изучение особенностей морфологии и микростроения натёчных карбонатных образований четвертого уровня набережной реки Туры в городе Тюмени для уточнения условий их формирования и возможности использования для оценки условий функционирования инженерного объекта.

**Методы исследований:** макроскопическое описание, мезоморфологические и микроскопические исследования натёчных карбонатных образований в прозрачных шлифах, сканирующая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ.

**Результаты.** Комплекс натёчных карбонатных новообразований четвертого уровня набережной р. Туры представлен натёчными корами и каплевидными образованиями (сталактитами). Исследованные натёчные карбонатные формы являются сложными образованиями, формирование которых происходит в несколько этапов, что подтверждают особенности морфологии и микростроения. Карбонатные коры являются многолетним образованием, а сталактиты – однолетним или квазисезонным, что говорит в пользу высоких скоростей их образования. Формирование техногенной спелеотермы на поверхностях нового инженерного сооружения в нехарактерных для такого рода образований условиях (продуваемое, открытое пространство) свидетельствует о высокой интенсивности процессов выщелачивания карбонатов из цементного раствора, использованного при строительстве набережной. Детальная оценка масштабов образования натёчных форм кальцита позволяет выявить потенциальные риски, связанные с долгосрочным функционированием объекта.

### Ключевые слова:

Натёчные формы кальцита, карбонатные коры, новообразования, техногенное минералообразование, сталактит, спелеотерма, Тюмень.

### Введение

Изучение минералогии образований техногенного происхождения является одним из динамично развивающихся направлений экологической минералогии и геоэкологии [1]. Среди множества проявлений техногенного минерагенеза в инженерно-технологических системах таких, например, как накипь теплообменной аппаратуры, солевых отложений нефтепромыслового оборудования, вторичных минералов стеновых покрытий [2, 3] и др., выделяются натёчные формы кальцита (сталактитов, сталагмитов и карбонатных кор) или «техногенные спелеотермы» [4], формирующиеся при выщелачивании карбонатов цементного камня с их последующим переотложением на поверхностях объектов инфраструктуры. Техногенные спелеотермы выявлены в пределах различных искусственных сооружений, функционирующих в условиях повышенной влажности: технологических полостей, систем канализации, вентиляции и водоочистки, паттернов платин, бетонных плит мостов, подвалов старых зданий, стен, горных выработок, туннелей, фортификационных сооружений и т. д. [4–9].

Следует отметить, что, несмотря на значительное распространение подобных образований, техногенные натёчные формы кальцита относительно слабо изучены, в отличие от их природных аналогов [4]. Дискуссионными являются вопросы о возможных скоростях и условиях формирования природных и техногенных спелеотерм. Отсутствует единое мнение относительно роли микробиальных сообществ в образовании натёчных новообразований кальцита: в отдельных работах они рассматриваются как существенный фактор, ускоряющий осаждение бикарбонатов [10–13], в других формирование спелеотерм рассматривается преимущественно как абиотический процесс [14, 15].

Формирование большинства описанных в научной литературе техногенных спелеотерм происходит в замкнутых, слабо проветриваемых пространствах старых инженерных сооружений и памятников архитектуры, рассматривается в основном как источник информации для уточнения представлений о химизме, условиях и возможных скоростях процессов аутигенного минералообразования. [4, 5]. В данной работе представлены результаты

исследования техногенных натёчных форм кальцита (сталактитов и карбонатных кор) отдельных участков высоких уровней набережной р. Туры в пределах города Тюмени. Данное местонахождение не является характерным для такого рода новообразований в силу высокой степени продуваемости и сравнительно небольшого возраста инженерного сооружения. Возникновение техногенных спелеотерм в подобных условиях представляет интерес как потенциальный индикатор интенсивности процессов выщелачивания и разрушения природных строительных материалов, таких как цемент и бетон. Соответственно, проявления техногенного минерогенеза могут использоваться для оценки качества проведенных строительных работ и использованных строительных материалов.

#### Объекты и методы исследований

Объектами исследования послужили натёчные карбонатные образования, формирующиеся на гранитном карнизе четвертого уровня набережной реки Туры центральной части г. Тюмени (рис. 1, а–д).

Набережная р. Туры является одним из крупнейших архитектурных проектов в истории горо-

да. Предполагаемая длина всего сооружения – около 4 км; количество уровней – 4 (нижний – затопляемый в половодье), средняя высота – 25 м (рис. 1, а). Первая очередь набережной от Свято-Троицкого мужского монастыря до Дома купца Прасолова протяженностью 2,4 км введена в эксплуатацию в 2012 г. [16]. В данный момент продолжают строительные работы на участках второй и третьей очередей от моста по ул. Челюскинцев до Масловского взвоза и от Моста влюбленных до устья реки Бабарынки. Большая часть набережной выполнена массивными гранитными плитами.

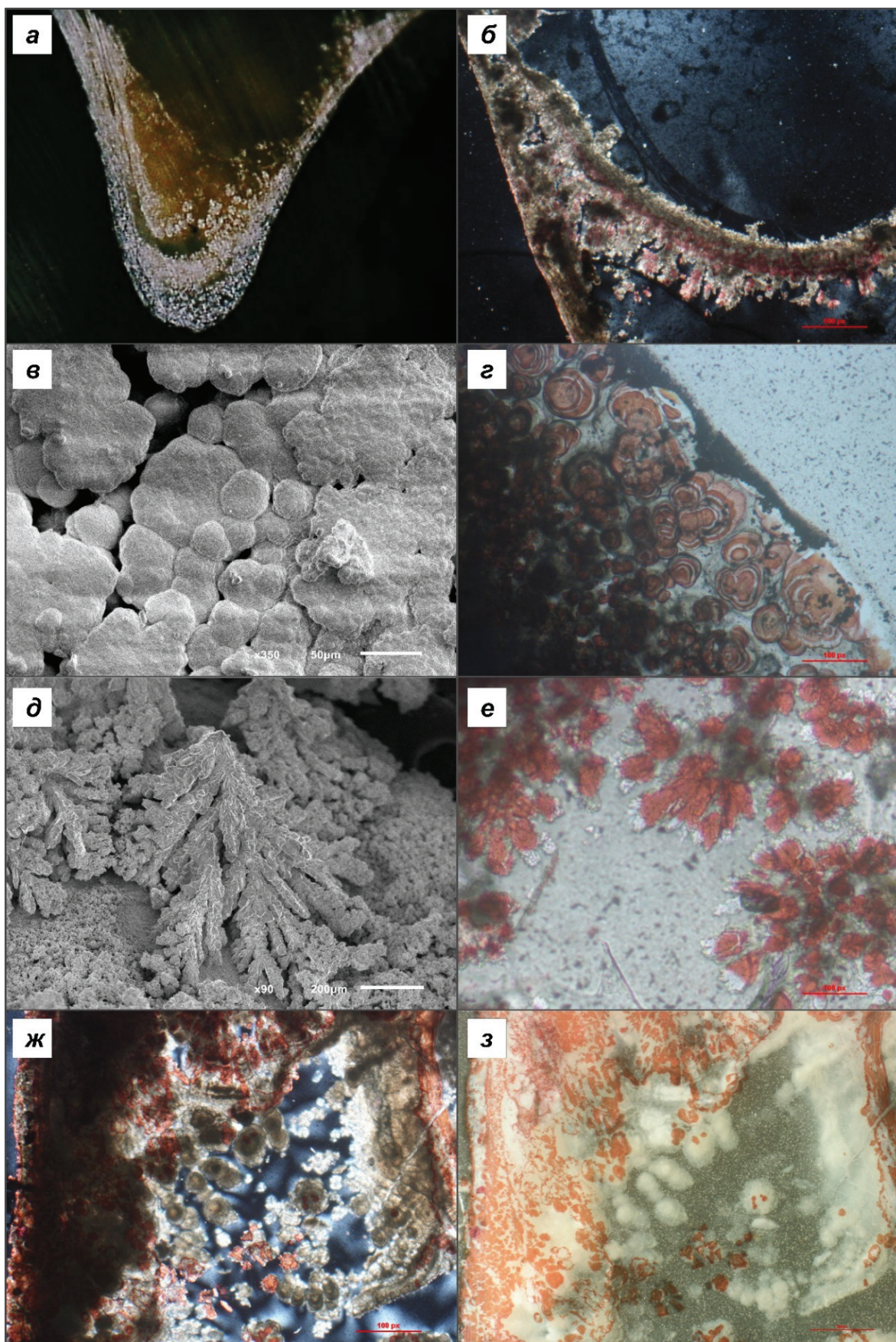
Образцы карбонатных новообразований и цементного камня для микроскопических и лабораторных исследований были отобраны осенью 2016 г. в пределах нескольких участков четвертого уровня набережной (ул. Володарского, д. 3). Несколько каплевидных форм были выбраны в качестве объектов для детальных микроскопических исследований. Изучение образцов проводилось в прозрачных шлифах, изготовленных из цельных новообразований (продольный и поперечный срезы) в ООО «ТЦЛ» (Тюменская центральная лаборатория) с использованием поляризационного ми-



**Рис. 1.** а) общий вид набережной реки Туры; б) участок пробоотбора; в) карбонатная корка, развивающаяся по строительному шву, заполненному цементным раствором; г) натёчное образование в виде «соломинкообразного» тела; д) капле-видное натёчное образование

**Fig. 1.** а) overview scheme of the Tyra river embankment; б) sampling site; в) carbonate crust devolping along an open joint filled with cement mortar; г) singer carbonate straw-like formation; д) tear-shaped carbonate singer formation







микроскопа Nikon Eclipse LV100POL и растрового электронного микроскопа JSM-6510LV-EDS, аналитического комплекса JEOL с рентгеновским энерго-дисперсионным спектрометром Oxford Instruments INCA Energy 350. Микроскопические исследования проводились на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (изучение в шлифах) и ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» (электронная микроскопия). Кроме того, для уточнения макроскопического описания использовался цифровой микроскоп Levenhuk DTX 500 Mobi (мезоморфологические исследования). Определение валового минерального состава карбонатных новообразований и цементного камня проводилось рентгеноструктурным методом в ООО «ЗапСибГЦ» (г. Тюмень) на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.

### Результаты и обсуждение

*Макроскопическое описание.* Натёчные образования кальцита высоких уровней набережной реки Туры представлены карбонатными корами и небольшими каплевидными формами – сталактитами (рис. 1, б–д).

Карбонатные коры – плотные цементированные слои, мощностью 4–6 мм, имеющие, как правило, неоднородную окраску от желтовато-бежевой до практически белой (рис. 1, в). Цвет, предположительно, зависит от концентрации оксидов железа (участки с выраженным буроватым оттенком), реже – от содержания механических примесей. Коры развиваются вдоль крупных швов, заполненных цементной смесью, постепенно расширяясь к низу в виде шлейфа.

Сталактиты представляют собой хрупкие полые натёчные формы диаметром до 12–15 мм у основания и длиной до 20–25 мм. Новообразования имеют форму усеченных конусов (каплевидную) или удлиненных «соломинок» одинакового диаметра (до 5–7 мм) при длине до 4 см (рис. 1, г–д). Толщина стенок новообразований не превышает 1–1,5 мм. Образования хрупкие, легко ломаются и

раскрашиваются после высыхания. Внешняя поверхность новообразований матовая, шероховатая, иногда с пылеватыми механическими включениями, часто наблюдаются слабозаметные зоны утончения, проявляющиеся в виде более темных участков. В ряде случаев отчетливо виден ступенчатый характер нарастания.

*Особенности микростроения.* При исследовании новообразований в прозрачных шлифах и с использованием электронного микроскопа фиксируются характерные различия внешней и внутренней поверхностей новообразований.

Внешняя поверхность достаточно однородная, гладкая, состоит из оолитообразных зонально окрашивающихся в ализарине микроагрегатов, имеющих концентрическое строение и срастающихся между собой, которые, предположительно, состоят из арагонита, так как такая форма наиболее характерна для этого минерала (рис. 2, в, г). Внутренняя поверхность неоднородная, представляет собой чередование участков небольших, однородно распределенных по площади, плохо сформированных кристаллов кальцита и участков с интенсивным ростом дендритообразных агрегатов, состоящих из уплощенных, заостренных к краю черепицеобразных микрокристаллов (рис. 2, д, е). Крупные древовидные агрегаты ориентированы от основания новообразования к вершине. Агрегаты, развивающиеся от боковых стенок к центру полости, как правило, меньше, но составляющие их кристаллы часто более обособлены и лучше сформированы. В отдельных случаях подобные образования, растущие от боковых стенок, формируют друг с другом сплошные мостовидные (хордообразные) ассоциации, пронизывающие полость натёчных новообразований, на которых начинается повторная активизация кристаллообразования. В ализарине дендритообразные агрегаты прокрашиваются неоднородно: в большинстве случаев окрашена центральная часть каждой ветви, края окрашиваются хуже или совсем не окрашиваются. В месте срастания дендритообразных агрегатов

**Рис. 2.** Особенности микростроения карбонатных новообразований: а) продольный срез каплевидного натёчного образования (с просматриваемым многослойным строением у основания с одной стороны) (аншлиф); б) поперечный срез каплевидного натёчного образования (просматривается двухслойное строение боковых стенок и сплошные мостовидные (хордообразные) ассоциации) (прозрачный шлиф, николи скрещены); в) сросшиеся оолитообразные образования, формирующие внешний слой боковых стенок спелиотерм (электронный микроскоп); г) срез внешнего слоя корки спелиотермы (различно концентрическое строение оолитообразных образований) (прозрачный шлиф, николи параллельны); д) внутренняя поверхность каплевидного новообразования. Дендритообразные агрегаты (электронный микроскоп); е) дендритообразные сростки кристаллов, прокрашенные ализарином (прозрачный шлиф, николи параллельны); ж, з) микроконкреции пелитоморфного сидерита (прозрачный шлиф, николи скрещены/отраженный свет)

**Fig. 2.** Microstructure features of carbonate singer forms: а) longitudinal section of a carbonate singer form (where multilayer structure is visible at the base of the form); б) cross section of the tear-shaped carbonate singer form, where two-layer structure of side walls and bridge-shaped association can be observed (transparent thin section, crossed nicole); в) fused spherical formations that form the outer layer of the tear-shaped form walls (electron microscope,); г) outer layer of the speleoterm where the concentric structure of spherical formations can be observed (transparent grinding, parallel nicole); д) inner surface of tear-shaped forms with tree-shaped aggregates (electron microscope); е) tree-shaped crystals dyed with alizarin (transparent grinding, parallel nicole); ж, з) visible microconcretions of pelitomorphous siderite (transparent grinding, crossed nicole, reflected light)

можно различить их первоначальные границы. Явные центры кристаллизации, с которых начинается рост древовидных сростаний микрокристаллов, не были выявлены, что косвенно может свидетельствовать в пользу того, что рост происходит в местах ослабления внешнего слоя, где в условиях повышенной концентрации вещества и неровности поверхности увеличивается интенсивность процессов кристаллообразования.

В единичных случаях узкие вершины конусов натёчных новообразований практически полностью заполняются веществом, создавая близкую к массивной текстуру, где помимо кальцита распространен также пелитоморфный сидерит (рис. 2, ж, з). Пелитоморфный сидерит частично развивается по кальциту, замещая его, а также в пустотном пространстве, сформированном агрегатами микрокристаллов кальцита, часто в виде микроконкреций.

Строение стенок изучаемых натёчных образований неоднородно. В редких случаях удалось отметить слабо различимые тонкие прослой в спилах на участках крепления конуса новообразований к гранитной плите (рис. 2, а, б). Стенки новообразований характеризуются двухсоставным строением: внешняя тонкая корка со следами растворения на внешней поверхности и внутренний слой, состоящий из массивного кальцита с различными реликтовыми очертаниями кристаллов, разрушенных агрегатов, на поверхности которого развиваются новые дендритообразные сростки микрокристаллов. Такой характер строения свидетельствует о неоднократном процессе перекристаллизации некоторых участков «тела» новообразований. Морфологически обособленные дендритообразные агрегаты кристаллов окружены практически ровными поверхностями, что подтверждает одновременность формирования стенок новообразований и их внутреннего пространства.

**Общий минералогический состав.** По данным рентгеноструктурного анализа, цементный камень, отобранный из строительных швов, имеет следующий состав (%): кварц – 63,8; калиевые по-

левые шпаты – 2,45; натриевые полевые шпаты – 10,43; каолинит – 10,53; гидрослюдистый материал – 0,92; кальцит – 15,34; сидерит – 5,52. Состав натёчных новообразований характеризуется практически 100 % содержанием кальцита (рис. 3). Наличие сидерита, обнаруженного при микроскопических исследованиях, косвенно подтвердилось по результатам анализа минерального состава цементного камня, но никак не отразилось в результатах анализа натёчных новообразований, что, по всей видимости, обусловлено локальным распространением данного минерала или его отсутствием в исследованной пробе.

**Особенности формирования.** Результаты проведенных исследований позволяют предположить, что формирование натёчных новообразований происходит в несколько этапов. Изначально в зонах, прилегающих непосредственно к строительным швам, формируется тонкая корка кальцита. Карбонатная корка, являясь многолетним образованием, постоянно увеличивает свою толщину и площадь с течением времени. Многократные процессы перекристаллизации и уплотнения приводят к значительному увеличению их прочности (рис. 4, а).

В дальнейшем на отвесных участках с выраженными неровностями начинают развиваться кольцевые образования, являющиеся основанием конуса натёчных форм и состоящие из арагонита, выпавшего из перенасыщенного (коллоидного) раствора. Со временем арагонит перекристаллизовывается в кальцит [17–19]. Диаметр колец в процессе роста спелеотерм постепенно уменьшается, что позволяет формирующим их каплям переносить вещество чуть дальше и приводит к удлинению стенок карбонатных новообразований (рис. 4, б, в). Таким образом, одновременно формируется как основное тело новообразования, так и внутренний микрорельеф, состоящий из дендритообразных агрегатов в зонах повышенного притока вещества, что соответствует ослабленным зонам внешней поверхности.

Рассмотренные объекты являются квазисезонными образованиями: большая часть конуса

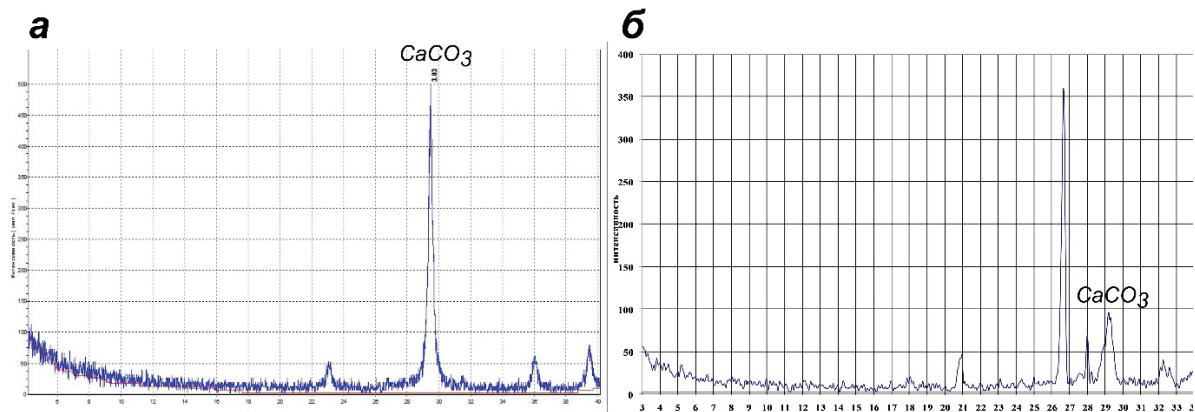
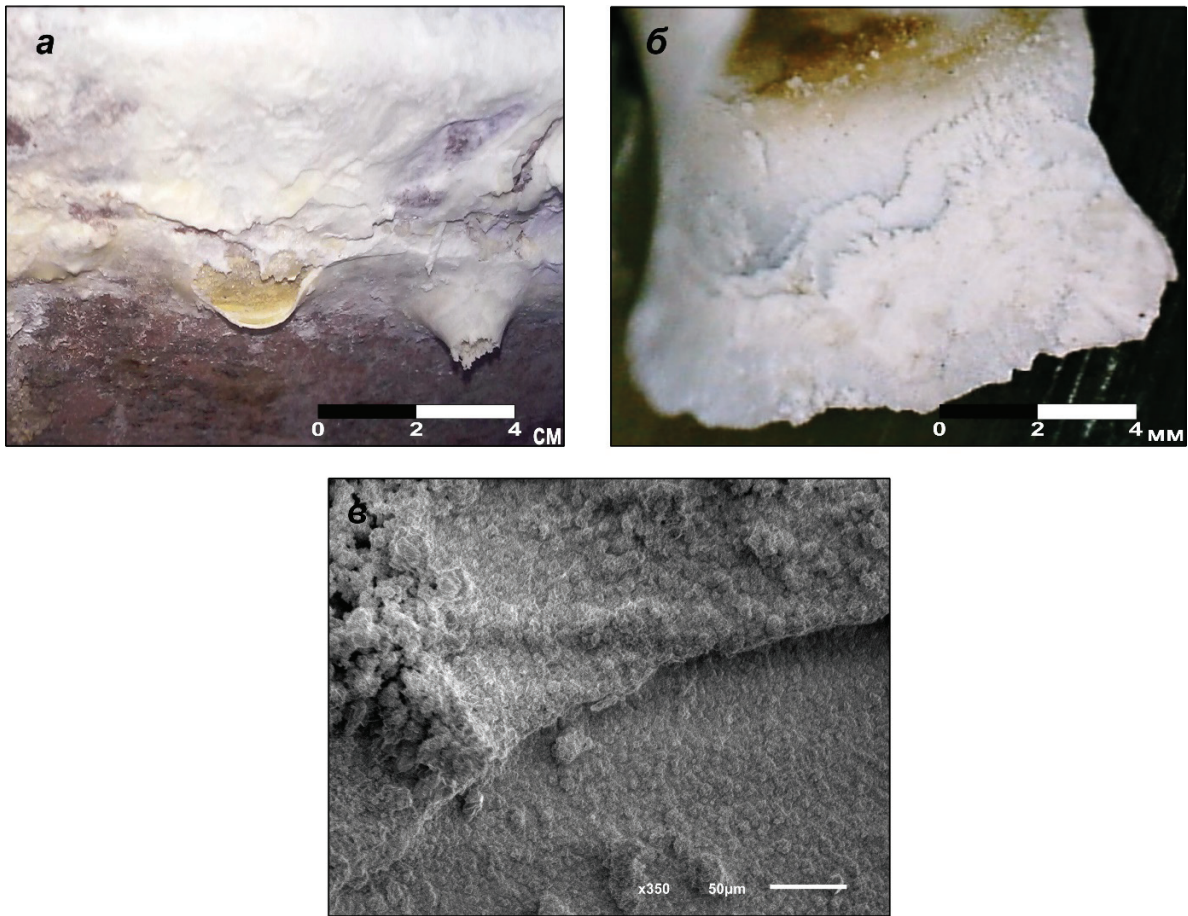


Рис. 3. Рентгенограммы исследованных образцов: а) натёчных карбонатных новообразований; б) цементного камня

Fig. 3. X-ray diagrams of the studied samples: а) singer carbonate formations; б) cement mortar



**Рис. 4.** а) кольцевые образования – основания каплевидной формы; б, в) изменение внутренней поверхности новообразования в процессе роста

**Fig. 4.** а) concentric structures – the tear-shaped form base; б, в) transformation of inner surfaces during the development of singer formation

натёчной формы ломается, раскашивается и растворяется при определенных погодных условиях (летняя засуха, экстремальный ветер, ливневые осадки). Сохраняющиеся кольцевые образования, как и коры, являются многолетними, выступают в качестве основания для развития новых каплевидных форм при благоприятных условиях.

#### Выводы

Проведенные исследования позволяют предположить, что натёчные карбонатные новообразования набережной реки Туры являются сложными объектами, формирование которых происходит в несколько этапов. На первом этапе возникает тонкая карбонатная корка, приуроченная к участкам, прилегающим непосредственно к зазорам между гранитными блоками. На участках с более выраженными неровностями в дальнейшем развиваются кольцевые образования, которые и становятся основанием каплевидных форм.

Стенки новообразований имеют двухсоставное строение: внешняя тонкая корка со следами растворения и внутренний слой, состоящий из массивного кальцита. Концентрическое слоистое строение, характерное для многолетних природных и техногенных сталактитов [4, 20, 21], практически не выражено; различные тонкие прослои обнаружены лишь у основания каплевидной формы. Таким образом, карбонатные коры являются многолетним образованием, а сталактиты – однолетним, что говорит в пользу высоких скоростей их формирования.

Особенности морфологии, микростроения и минерального состава исследованных новообразований свидетельствуют о высокой интенсивности выщелачивания компонентов цементного камня. Дальнейшая детальная оценка скорости образования натёчных форм кальцита на поверхностях набережной позволит выявить потенциальные риски, связанные с долгосрочным функционированием объекта.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Журняк Л.В. Минералогия техногенных образований. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 160 с.
2. Михайлова К.Ю., Таловская А.В., Литав В.В. Минеральные и техногенные образования в твердом осадке снега в западной части города Омска // Вопросы естествознания. – 2015. – № 3 (7). – С. 114–118.
3. Минералого-геохимические особенности солевых отложений (накипи) из бытовой теплообменной аппаратуры / Б.Р. Соколов, Л.П. Рихванов, С.С. Ильенок, Ш.Ж. Усенова // Минералогия техногенеза. – 2014. – № 15. – С. 140–146.
4. Каздым А.А., Чижова А.А., Астахов М.И. Техногенные карбонатные новообразования на бетонных покрытиях моста через р. Нерль (Ярославская область) // Минералогия техногенеза. – 2005. – Т. 6. – С. 32–39.
5. Техногенные спелеотермы / С.С. Потапов, Н.В. Паршина, Н.Г. Максимович, В.А. Наумов // Минералогия техногенеза. – 2005. – Т. 6. – С. 12–22.
6. Каздым А.А. Природные и техногенные образования кальцита – натёки и спелеотермы: генезис, морфология, микростроение // Минералогия техногенеза. – 2007. – Т. 8. – С. 269–287.
7. Максимович Г.А. Карбонатные сталактиты и сталагмиты в подвале Московского университета // Пещеры. – 1976. – Т. 16. – С. 24–35.
8. Каздым А.А. Древние техногенные спелеообъекты как историко-археологические памятники и проблемы аутигенного спелеоминералогенеза // Минералогия техногенеза. – 2006. – Т. 7. – С. 53–68.
9. Three centuries of heavy metal pollution in Paris (France) recorded by urban speleothems / E. Pons-Branchu, S. Ayrault, M. Roy-Barman, L. Bordier, W. Borst, Ph. Branchu, E. Douville, E. Dumont // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 518–519. – P. 86–96.
10. Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Техногенный кальцит на фортификационных сооружениях острова Дюрёйа (Тромс, северная Норвегия) // Минералогия техногенеза. – 2016. – Т. 17. – С. 173–177.
11. Техногенное отложение биокарбонатов и экспериментальное их образование / Л.В. Леонова, С.С. Потапов, Л.Ю. Кузьмина, О.Я. Червяцова, С.П. Главатских, А.С. Рябова // Минералогия техногенеза. – 2014. – Т. 15. – С. 113–129.
12. Forti P. Biogenic speleothems: an overview // International Journal of Speleology. – 2001. – V. 30. – № 1. – P. 39–56.
13. Jones B. Microbial Activity in Caves – a Geological Perspective // Geomicrobiology Journal. – 2001. – V. 18. – № 3. – P. 345–357.
14. Jones B. Microbes in caves: agents of calcite corrosion and precipitation // Tufas and Speleothems: Unravelling the microbial and physical controls / ed. by H.M. Pedley, M. Rogerson. – London: Geological Society, 2010. – Special Publication № 336. – P. 7–30.
15. The role of microorganisms in the formation of a stalactite in Botovskaya Cave, Siberia – paleoenvironmental implications / M. Paction, S.F.M. Breitenbach, F.A. Lechleitner, A. Vaks, C. Rollion-Bard, O.S. Gutareva, A.V. Osintcev, C. Vasconcelos // Biogeosciences. – 2013. – V. 10. – № 9. – P. 6115–6130.
16. Kendall A.C., Broughton P.L. Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals // Journal of Sedimentary Petrology. – 1978. – V. 48. – № 2. – P. 519–538.
17. Белоус И.В. Архитектурно-градостроительное сравнение набережных региональных центров Сибири // Современные проблемы архитектуры, градостроительства, дизайна: II Международная научно-практическая конференция. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2014. URL: [http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/20879/arhitekturno-gradostroitel%27noe\\_sravnenie\\_naberezhnyh\\_regional%27nyh\\_centrov\\_sibiri\\_31\\_07\\_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/20879/arhitekturno-gradostroitel%27noe_sravnenie_naberezhnyh_regional%27nyh_centrov_sibiri_31_07_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (дата обращения: 27.12.2016).
18. Hill C.A., Forti P. Cave Minerals of the World. Second edition. – Huntsville, Ala.: National speleological society, 1997. – 463 p.
19. Verrecchia E.P., Verrecchia K.E. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification // Journal of Sedimentary Research. – 1994. – V. 64. – № 3A. – P. 650–664.
20. The biogenic origin of needle fibre calcite / G. Cailleau, E.P. Verrecchia, O. Braissant, L. Emmanue // Sedimentology. – 2009. – V. 56. – P. 1858–1875.
21. Annually Laminated Speleothems: a Review / A. Baker, C.L. Smith, C. Jex, I.J. Fairchild, D. Genty, L. Fuller // International Journal of Speleology. – 2008. – V. 37. – № 3. – P. 193–206.

Поступила 10.02.2017 г.

## Информация об авторах

Новоселов А.А., специалист НОЦ «Геология нефти и газа» Тюменского индустриального университета.



UDC 549.74

## SINGER CARBONATE TECHNOGENIC MINERAL FORMATIONS OF THE TYRA RIVER EMBANKMENT: DEVELOPMENT CONDITIONS, STRUCTURE FEATURES AND INDICATION POTENTIAL

Andrey A. Novoselov,

mr.andreygeo@mail.ru

Tyumen industrial university,  
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

**Relevance of the discussed issue.** The study of technogenic mineral formation is one of the dynamically developing research directions of mineralogy and environmental geosciences. At present, one can observe a constant increase in the number of studies devoted to the mineral composition of formations of various natural-anthropogenic environments and technological systems: atmospheric dust aerosols, salt deposits of water and heat exchange equipment, etc. Formation of calcite singer bodies (stalactites, stalagmites and carbonate crusts) within different engineering structures due to carbonate leaching from cement matrix and their subsequent re-deposition is one of the most common types of technogenic minerogenesis. In modern scientific literature, the term «technogenic speleothems» is used to define this phenomenon. Technogenic speleothem formation is of interest not only as a practicable source of information on possible speeds and background of authigenic mineral formation, but also as a potential indicator of engineering structure's functioning conditions, as well as to assess the quality of construction works and used building materials.

**The main aim** of the research work is to study the morphology and microstructure of singer carbonate formations of the fourth level of the Tyra river embankment located within the Tyumen city to clarify the conditions of their formation and the possibility of their application to assess the functioning conditions of the engineering structure.

**The methods used in the research:** macroscopic description, mesomorphological and microscopic studies of carbonate singer formations in thin sections, scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis.

**The results.** Carbonate crusts and stalactite-like speleothems present the complex of carbonate singer forms examined within the fourth level of embankment. The results of microscopic studies confirm that carbonate singer forms are complicated structures and their development proceeds during several stages. Carbonate crusts are the long-term formations, while «stalactites» are the annual or quasisesonal ones; that supports the high speed of their development. Growth of technogenic speleothems within the new engineering structure in uncharacteristic for this kind of formation conditions (well-blown, open space) indicates the high intensity of carbonates leaching from cement mortar used in the construction of the embankment. The detailed assessment of the scale of calcite dripstones formation on the surfaces of the embankment may be used for identifying the potential risks associated with long-term operation of the facility.

### Key words:

Singer calcite mineral formations, carbonate crusts, neocrystallisation, technogenic minerogenesis, stalactite, embankment, speleothems, Tyumen.

### REFERENCES

1. Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhorniyak L.V. *Mineralogiya tekhnogennykh obrazovaniy* [Mineralogy of technogenic formations]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 160 p.
2. Mikhaylova K.Yu., Talovskaya A.V., Litau V.V. Mineral and anthropogenic particles in insoluble sediment of snow in the Western part of Omsk. *Voprosy estestvoznaniya*, 2015, no. 3 (7), pp. 114–118. In Rus.
3. Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Ilyenok S.S., Usenova S.Z. Mineralogical and geochemical peculiarities of salt deposits (limescale) from household heat-exchange equipment. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2014, no. 15, pp. 140–146. In Rus.
4. Kazdym A.A., Chigova A.A., Astachov M.I. New man-caused carbonate formations on concrete surfaces of the Nerl-river bridge. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2005, vol. 6, pp. 32–39. In Rus.
5. Potapov S.S., Parshina N.V., Maximovich N.G., Naumov V.A. Technogenic speleothems. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2005, vol. 6, pp. 12–22. In Rus.
6. Kazdym A.A. Prirodnye i tekhnogennye obrazovaniya kaltsita – nateki i speleotemy: genesis, morfologiya, mikrostroenie [Natural and man-made formation of calcite – sinters and shelfstones: genesis, morphology, microstructure]. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2007, vol. 8, pp. 269–287.
7. Maksimovich G.A. Karbonatnye stalaktity i stalagmity v podvale Moskovskogo universiteta [Carbonate stalactites and stalagmites in the basement of the Moscow State University]. *Peshchery*, 1976, vol. 16, pp. 24–35.
8. Kazdym A.A. Ancient technogenic speleological objects as historical and architectural monuments and the problems of autigenic speleominerogenesis. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2006, vol. 7, pp. 53–68. In Rus.
9. Pons-Branchu E., Ayrault S., Roy-Barman M., Bordier L., Borst W., Branchu P., Douville E., Dumont E. Three centuries of heavy metal pollution in Paris (France) recorded by urban speleothems. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 518–519, pp. 86–96.
10. Erokhin Yu.V., Khiller V.V. Tekhnogenny kaltsit na fortifikatsionnykh sooruzheniyakh ostrova Dyureya (Troms, severnaya Norvegiya) [Man-made calcite on fortifications of the island Dyurëya (Troms, Northern Norway)]. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2016, vol. 17, pp. 173–177.
11. Leonova L.V., Potapov S.S., Kuzmina L.Yu., Cherviatsova O.Ya., Glavatskikh S.P., Riabova A.S. Technogenic sediments of biokarbonates and their experimental formation. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2014, vol. 15, pp. 113–129. In Rus.
12. Forti P. Biogenic speleothems: an overview. *International Journal of Speleology*, 2001, vol. 30, no. 1, pp. 39–56.
13. Jones B. Microbial Activity in Caves – a Geological Perspective. *Geomicrobiology Journal*, 2001, vol. 18, no. 3, pp. 345–357.
14. Jones B. Microbes in caves: agents of calcite corrosion and precipitation (in Tufas and Speleothems: Unravelling the microbial and physical controls. Eds. H.M. Pedley, M. Rogerson. *Geological Society Special Publications*, 2010, no. 336, pp. 7–30.
15. Pacton M., Breitenbach S.F.M., Lechleitner F.A., Vaks A., Rolion-Bard C., Gutareva O.S., Osintcev A.V., Vasconcelos C. The role of microorganisms in the formation of a stalactite in Botovskaya Cave, Siberia – paleoenvironmental implications. *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, no. 9, pp. 6115–6130.

16. Kendall A.C., Broughton P.L. Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1978, vol. 48, no. 2, pp. 519–538.
17. Belous I.V. Arkhitekturno-gradostroitelnoe sravnenie naberezhnykh regionalnykh tsentrov Sibiri [Architecture and urban waterfronts comparison of regional centers of Siberia]. *Sovremennye problemy arkhitektury, gradostroitelstva, dizayna. II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Proc. II International scientific-practical conference. Modern problems of architecture, urban planning, design]. Krasnoyarsk, 2014. Available at: [http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/20879/arhitekturno-gradostroitel%27noe\\_sravnenie\\_naberezhnyh\\_regional%27nyh\\_centrov\\_sibiri\\_31\\_07\\_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/20879/arhitekturno-gradostroitel%27noe_sravnenie_naberezhnyh_regional%27nyh_centrov_sibiri_31_07_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (accessed: 27 December 2016).
18. Hill C.A., Forti P. *Cave Minerals of the World*. Second edition. Huntsville, Ala., National speleological society, 1997. 463 p.
19. Verrecchia E.P., Verrecchia K.E. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, vol. 64, no. 3A, pp. 650–664.
20. Cailleau G., Verrecchia E.P., Braissant O., Emmanue L. The biogenic origin of needle fibre calcite. *Sedimentology*, 2009, vol. 56, pp. 1858–1875.
21. Baker A., Smith C.L., Jex C., Fairchild I.J., Genty D., Fuller L. Annually Laminated Speleothems: a Review. *International Journal of Speleology*, 2008, vol. 37, no. 3, pp. 193–206.

Received: 10 February 2017.

#### Information about the authors

**Andrey A. Novoselov**, specialist, Tyumen industrial university.

УДК 550.834

## ПРОГНОЗ ТИПОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НА ОСНОВЕ ФАЗОВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Иванченков Виктор Павлович<sup>1</sup>,

am@am.tpu.ru

Кочегуров Александр Иванович<sup>1</sup>,

kaicc@tpu.ru

Нгуен Суан Хунг<sup>1</sup>,

hungnx@tpu.ru

Орлов Олег Викторович<sup>1</sup>,

orloff.oleg@mail.ru

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

**Актуальность работы.** При решении задач прогноза геологического разреза, в том числе прогноза нефтегазоносности осадочных толщ, по данным сейсмических наблюдений наиболее широко используются в качестве диагностических признаков динамические характеристики отраженных волн, непосредственно связанные с их амплитудой и энергией. Информация о свойствах фазочастотных характеристик сейсмических волн до последнего времени практически не использовалась. Между тем в фазу сейсмических сигналов, а точнее в сложный закон изменения их фазовых спектров, заложена информация о положении границ раздела анализируемых толщ, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых геологических сред. Поэтому фазочастотные характеристики отраженных волн могут быть использованы в качестве важных диагностических признаков при прогнозе нефтегазоносности осадочных толщ.

**Цель исследования:** разработать алгоритма прогноза и картирования типов геологического разреза на основе метода фазовременного анализа (ФАН-анализ) сейсмических записей; исследовать эффективность данного алгоритма на моделях геологических сред и опробовать его применение для обработки и интерпретации материалов ОГТ, полученных на Конторовичском нефтяном месторождении.

**Методы исследования:** цифровая обработка пространственно-временных сигналов и полей, методы дискретного преобразования Фурье, математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

**Результаты.** Показана возможность извлечения полезной информации из фазочастотных характеристик сейсмических сигналов для формирования диагностических признаков при прогнозе геологического разреза. На основе выбранных признаков разработан метод фазовременного анализа сейсмических записей и построен алгоритма прогноза и картирования типов геологического разреза. Проведены исследования данного алгоритма на моделях слоистых поглощающих сред, а также опытная обработка и интерпретации реальных данных. Полученные результаты подтвердили перспективность применения фазовременного анализа для прогноза типов геологического разреза в межскважинном пространстве.

### Ключевые слова:

Прогноз типов геологического разреза, метод фазовременного анализа, алгоритмы фазочастотного прослеживания сейсмических волн, межскважинное пространство.

### Введение

При обработке и интерпретации данных сейсмических наблюдений, получаемых при поиске месторождений нефти и газа, значительное развитие в последнее время получили методы, направленные на оценку свойств исследуемого геологического разреза [1–4]. Среди широкого спектра решаемых при этом задач можно выделить задачу прогноза типов геологического разреза в около- и межскважинном пространстве [5, 6]. Для решения данной задачи наиболее широкое признание получил метод спектрально-временного анализа (СВАН), в основу которого положен алгоритм, реализующий целенаправленный перебор частотных фильтров и регистрации последовательностей амплитуд, отфильтрованных сигналов в виде так называемых СВАН-колонок [3, 7]. На изображе-

ниях СВАН-колонок в интегральной форме находят специфические отражения геологических характеристик изучаемого разреза.

При количественной классификации типов разреза в СВАН в качестве информативных параметров используются только энергетические спектры выделяемых сеймосигналов. Информация о фазочастотных характеристиках (ФЧХ) сигналов при СВАН-анализе не используются. Между тем в фазовые спектры отраженных сейсмических волн заложена важная информация о положении границ раздела анализируемых толщ, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых геологических сред. ФЧХ отраженных волн могут быть использованы в качестве важных диагностических признаков при прогнозе нефтегазоносности осадочных толщ [8–14].

### Метод фазовременного анализа

В статье рассматривается метод фазовременного анализа (ФАН-анализ) сейсмических записей и разработанный на его основе алгоритм прогноза и картирования типов геологического разреза. Приводятся результаты исследования данного алгоритма на моделях слоистых поглощающих сред, а также отдельные примеры его применения при интерпретации реальных данных. Предварительно отметим основные принципы ранее предложенных фазочастотных алгоритмов прослеживания (ФЧП) сейсмических волн, на базе которых был реализован метод фазовременного анализа. Алгоритмы ФЧП были разработаны для выделения сейсмических волн и границ при решении задач структурной сейсморазведки. В общем случае функция качества (критерий оценки временного положения сигналов) этих алгоритмов имеет вид [10, 11]:

$$L(t) = \sum_{i=1}^m W(f_i) \cos[\varphi(f_i, t)], \quad (1)$$

где  $W(f_i)$  – частотная весовая функция, вид которой определяет реализуемый алгоритм;  $\varphi(f_i, t)$  – текущий фазовый спектр участка сейсмотрассы, вычисляемый в скользящем окне анализа.

Для равновесного алгоритма весовая функция  $W(f_i)$  принимается равной единице во всей полосе анализируемых частот. Для алгоритмов с неравновесной обработкой  $W(f_i)$  может быть задана, например, в виде треугольной, синусоидальной или экспоненциальной функции. Определение временного положения сигналов при этом осуществляется путем оценки местоположения экстремума функции качества (1). Исследования алгоритмов показали, что они обладают высокой помехоустойчивостью и разрешающей способностью [11]. Так, алгоритм ФЧП с неравновесной обработкой обеспечивает разрешение сигналов по вертикали порядка четверти длины волны [11].

Проведенный анализ также показал, что при прослеживании отдельного сигнала  $S(t)$  функция качества ФЧП в непрерывной форме может быть представлена [15]:

$$L(t) = F^{-1}\{W(f)e^{j\varphi_s(f)}\}, \quad (2)$$

где  $F^{-1}$  – оператор обратного преобразования Фурье;  $\varphi_s(f)$  – фазовый спектр сигнала.

Тогда, рассматривая модель слоистой поглощающей толщи с системных позиций, простейшая схема которой приведена на рис. 1, а, получим, что при прослеживании сигнала  $S_2(t)$ , отраженного от подошвы поглощающего слоя II, функция качества ФЧП с учетом (2) будет равна [15]:

$$L_2(t) = L_0(t) \otimes h_L(t),$$

где  $L_0(t)$  – функция качества при прослеживании падающей волны  $S_0(t)$ ;  $h_L(t) = F^{-1}\{H_L(f)\}$ ,  $H_L(f) = e^{i\varphi_{H_2}(f)}$ ;  $\varphi_{H_2}(f)$  – фазочастотная характеристика системы, определяющая передачу сигнала  $S_2(t)$  (рис. 1, б).

Выражение для  $\varphi_{H_2}(f)$  в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 1, б) после несложных преобразований можно записать:

$$\varphi_{H_2}(f) = \varphi_{r_{12}}(f) + \varphi_{k_{23}}(f) + \varphi_{H_c}(f) + \varphi_{r_{21}}(f),$$

где  $\varphi_k(f)$ ,  $\varphi_r(f)$  – соответственно аргументы комплексных коэффициентов отражения  $k(f)$  и преломления  $r(f)$ ;  $\varphi_{H_c}(f)$  – ФЧХ системы, определяющей распространение волны в поглощающем слое II в двух направлениях.

Согласно [16, 17], аргументы коэффициентов отражения и преломления определяются акустическими жесткостями и поглощающими свойствами контактирующих сред. В свою очередь ФЧХ поглощающего слоя II зависит от скорости распространения волны и параметров поглощения данного слоя [16].

Отмеченная выше взаимосвязь функции качества алгоритмов ФЧП со структурными особенностями слоистых толщ и их петрофизическими параметрами послужили основными предпосылками для разработки метода фазовременного анализа. При проведении ФАН-анализа используется алгоритм ФЧП с неравновесной обработкой. Для каждой сейсмической трассы в области исследуемой толщи в соответствии с (1) формируется совокупность функций качества ФЧП:

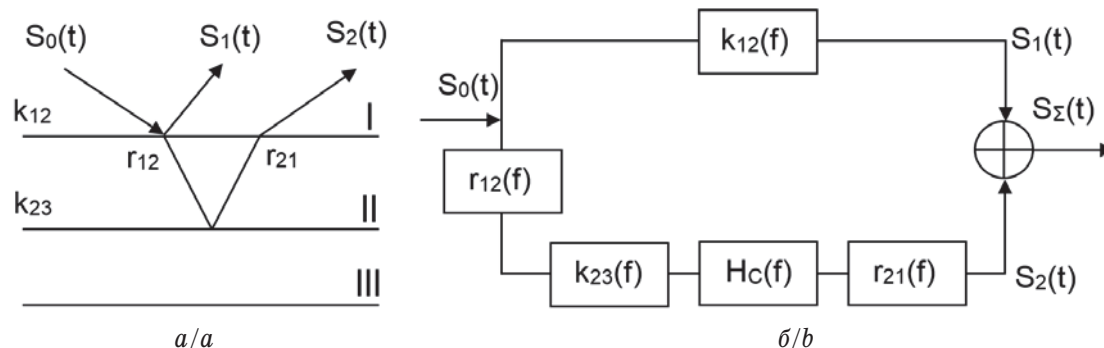


Рис. 1. Представление формирования отраженных волн в виде эквивалентной системы. а) модель среды; б) эквивалентная схема

Fig. 1. Representation of reflected waves formation in the form of an equivalent system. а) the environmental model; б) the equivalent circuit



$$L_k(t) = \sum_{i=1}^m W_k(f_i) \cos[\varphi(f_i, t)], \quad (3)$$

значения которых вычисляются по результатам многократного фазочастотного прослеживания волн на трассе при различных частотных параметрах весовых функций  $W_k(f_i)$ . При этом индекс  $k$  определяет номер весовой функции.

В качестве весовой функции при ФАН-анализе используется треугольная весовая функция:

$$W_k(f_i) = \begin{cases} 0, & f_i \leq f_n, f_i > f_b; \\ \frac{2}{3f_c}(f_i - f_n), & f_n < f_i \leq f_c; \\ -\frac{1}{f_c}(f_i - f_b), & f_c < f_i \leq f_b, \end{cases}$$

где  $f_c$  – частота максимума весовой функции  $W_k(f)$ ;  $f_n, f_b$  – соответственно нижняя и верхняя частоты весовой функции.

Вид треугольной весовой функции (фильтра) представлен на рис. 2.

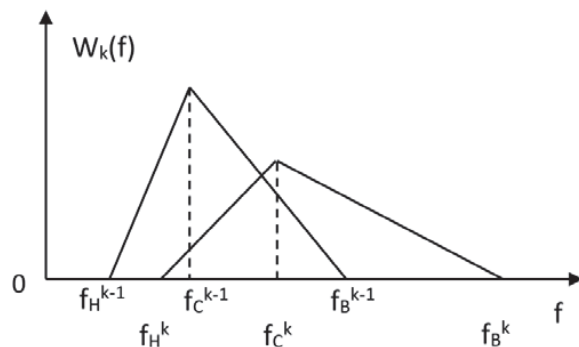


Рис. 2. Вид треугольной весовой функции

Fig. 2. Triangular weighting function

Параметры  $W_k(f)$  при ФАН-анализе в выражении (3) изменяются так, чтобы центральная частота весовой функции удовлетворяла следующему соотношению:

$$f_c^k = \frac{f_n^m - f_n^1}{(m-1)^p} (k-1)^p + f_c^1,$$

где  $m$  – количество весовых функций;  $f_c^m$  – центральная частота последней функции;  $f_c^1$  – центральная частота первой функции;  $p$  – выбранный параметр крутизны.

Совокупность функций качества вида (3) образует ФАН-колонку (ФАН-образ) в координатах  $t, f_c$  для каждой анализируемой сеймотрассы, а совокупность ФАН-образов для набора сеймотрасс, полученных в различных точках наблюдения, образует ФАН-разрез (разрез ФАН-Г). Различия в таких важных свойствах анализируемых толщ, как слоистость, акустическая жесткость, поглощение, мощность, пористость, проницаемость, отражаются в ее ФАН-образе. При этом ФАН-образы, которые определяются закономерностями распределе-

ния амплитуд функций качества ФЧП в координатах частота–время, будут различаться рисунком записи, т. е. протяженностью, интенсивностью, взаимным расположением и наклоном выделяемых осей синфазности в заданном частотном диапазоне. Такая чувствительность ФАН-образов к изменению структурных и петрофизических свойств среды позволяет использовать их как основу для построения методики прогноза типа геологического разреза.

#### Алгоритм прогноза типов геологического разреза

На основе ФАН-анализа был разработан алгоритм прогноза типов геологического разреза, структурная схема которого приведена на рис. 3. Предварительно для реализации алгоритма в процессе обработки сейсмических материалов определяют ФАН-образы в точках расположения скважин в заданном интервале глубин. На основе имеющейся информации о геофизическом исследовании скважин (ГИС) и результатов их испытаний выделенные ФАН-образы классифицируют по типам геологического разреза и рассматривают при прогнозе как эталонные. Далее для различных точек наблюдения в около-межскважинном пространстве находят ФАН-образы и строят разрезы ФАН-Г. Образы на разрезах ФАН-Г сопоставляют с эталонными ФАН-образами, полученными в точках расположения скважин. На этой основе выносятся решение о распространении определенного типа разреза в около-межскважинном пространстве.

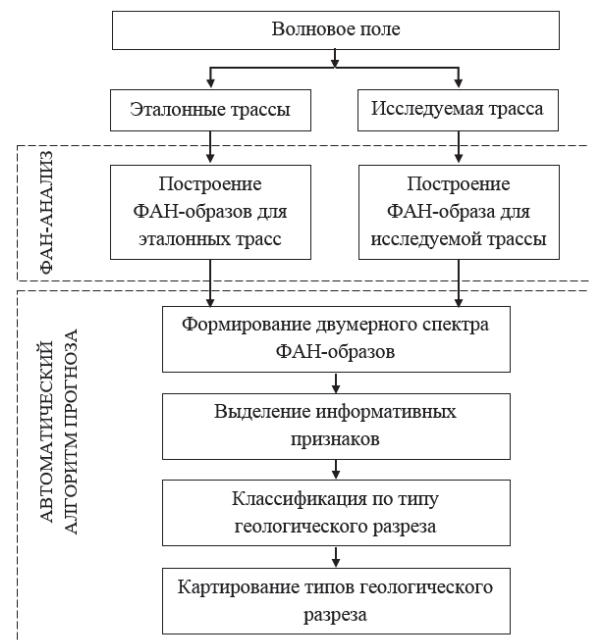


Рис. 3. Обобщенная схема алгоритма прогноза типа геологического разреза

Fig. 3. Generalized scheme of prediction algorithm for the type of geological section

В предложенном алгоритме прогноза для выделения вектора информативных признаков при

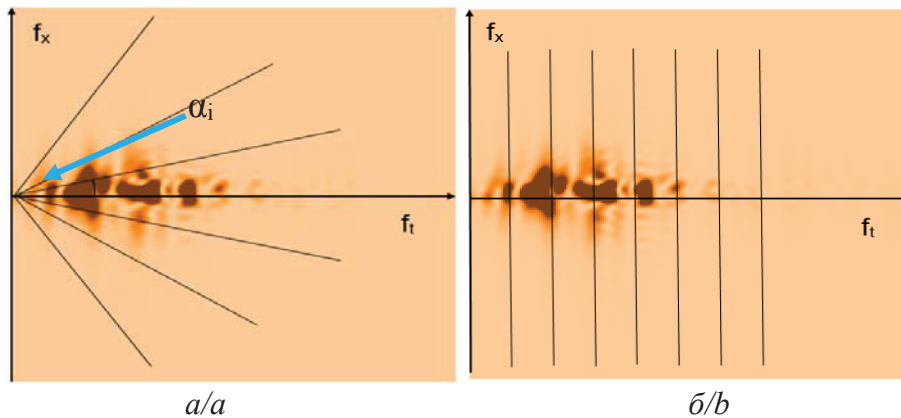


Рис. 4. Секторная (а) и полосовая (б) маски

Fig. 4. Sector (a) and striped (b) masks

проведении автоматической классификации определяется двумерный энергетический спектр формированных изображений ФАН-образов. Информативные вектора, соответствующие различным ФАН-образам, находятся из спектров изображений с помощью специально синтезированных масок, которые разбивают Фурье-плоскость на  $L$  областей. Если обозначать через  $s_i$  элемент Фурье-плоскости, соответствующей  $i$ -й области разбиения, то  $i$ -я составляющая вектора признаков будет иметь вид:

$$x_i = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} |F(f_t, f_x)|^2 \cdot df_t \cdot df_x}{\iint_{-\infty}^{+\infty} |F(f_t, f_x)|^2 \cdot df_t \cdot df_x},$$

где  $i=0 \div L-1$ .

В результате анализа структуры двумерных спектров ФАН-образов было синтезировано две маски: секторная и полосовая (рис. 4).

Секторная маска использовалась для отбора информации о распределении нормированной энергии по углу  $\alpha$ , полосовая – для отбора информации о распределении нормированной энергии по временной частоте  $f_t$ . В качестве дополнительных информативных параметров были введены значения временной мощности анализируемых толщ в заданной полосе частот.

#### Результаты экспериментов

Исследование предложенного алгоритма прогноза проводилось на моделях слоистых поглощающих сред, обладающих различным коллекторам. Обобщенная структура принятых моделей среды и петрофизические параметры отдельных слоев: скорость распространения продольной волны  $V$ , плотность пород  $\rho$ , параметр поглощения  $\beta$ , мощность слоя  $h$ , приведены в табл. 1.

В зависимости от свойств продуктивной толщи (слоя песчаника) различали четыре типа разреза. В первом случае песчаный слой предполагался на-

сыщенным газом, во втором – нефтью, в третьем – водой. В четвертом случае в модели имитировалось наличие непроницаемого карбонизированного песчаника. В зависимости от типа разреза петрофизические параметры продуктивной толщи выбирались исходя из обобщенных данных, характерных для верхнеюрской продуктивной толщи Крапивинского нефтяного месторождения [18]. В табл. 2 приведены пределы изменения значений петрофизических параметров продуктивной толщи Крапивинского нефтяного месторождения, задаваемые при проведении экспериментов.

Таблица 1. Структура среды и петрофизические параметры ее слоев

Table 1. Structure of the environment and petrophysical parameters of its layers

	$V$ , м/с (m/s)	$\rho$ , г/см <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$ , с/м (s/m)	$h$ , м (m)
Верхний слой/Upper layer	2500	2,50	0,00002	200
Аргиллиты/Argillite	2700	2,50	0,000015	20
Продуктивная толща/Productive strata				20
Аргиллиты/Argillite	3000	2,55	0,000015	10
	3100	2,60	0,000014	10
	3200	2,65	0,000013	10
	3100	2,55	0,000014	10
	3000	2,50	0,000015	10
Нижний слой/Bottom layer	3000	2,60	0,000015	200

Как показал анализ, указанные в табл. 2 значения параметров достаточно хорошо согласуются с петрофизическими характеристиками верхнеюрской продуктивной толщи и ряда других месторождений Томского приобья. Мощность первого слоя в принятых моделях среды задана условно и не привязана к глубине залегания продуктивной толщи, так как ставилась основная задача исследования классификации типов разреза, обладающих различными коллекторскими свойствами применительно к условиям основного продуктивного горизонта.

**Таблица 2.** Пределы изменения петрофизических параметров продуктивной толщи

**Table 2.** Limits of change in the petrophysical parameters of the productive strata

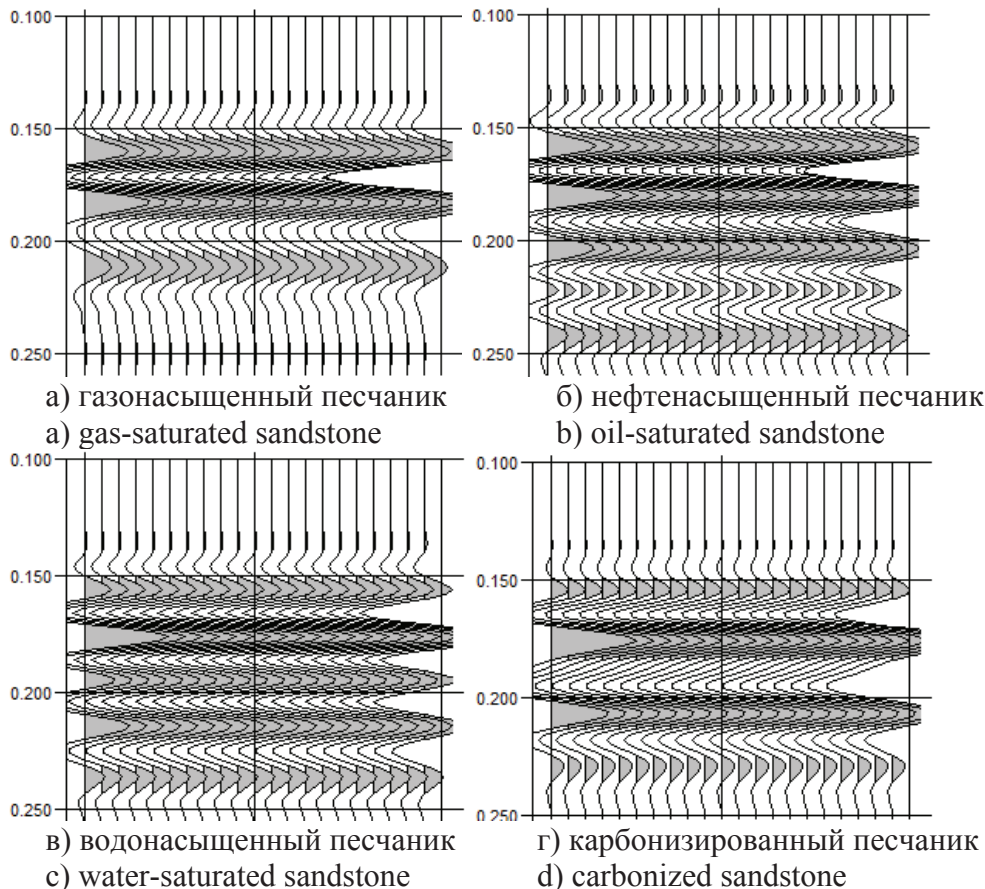
Тип продуктивной толщи Type of productive strata	$V$ , м/с (m/s)	$\rho$ , г/см <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$ , с/м (s/m)
Газонасыщенный песчаник Gas-saturated sandstone	2400–3100	2,02–2,72	0,0001–0,0005
Нефтенасыщенный песчаник Oil-saturated sandstone	2822–3420	2,02–2,72	0,000045–0,0001
Водонасыщенный песчаник Water-saturated sandstone	3400–3800	2,32–2,77	0,00003–0,00005
Карбонизированный песчаник Carbonized sandstone	4200–5800	2,4–2,8	0,00001–0,00002

Формирование волновых полей, соответствующих заданной модели среды, осуществлялось на ЭВМ с помощью специально разработанной программы. В качестве примера на рис. 5 показаны

фрагменты сформированных волновых полей для указанных выше моделей сред, соответствующих различным типам разреза. На рис. 6 представлены определенные в этом случае ФАН-образы для указанных типов разреза. Из рис. 6 видно, что для различных типов разреза ФАН-образы значительно различаются интенсивностью, протяженностью, взаимным расположением и наклоном выделяемых на их изображениях осей синфазности.

Указанные различия находят отражение в вычисляемых при прогнозе указанных выше векторах информативных параметров  $E_\alpha$  и  $E_f$  (рис. 7).

Для проведения классификации выделенных информативных векторов признаков ФАН-образов применялись методы кластерного анализа и искусственных нейронных сетей [19, 20]. Из известных методов кластерного анализа был выбран метод k-средних, который широко используется на практике для решения различных задач. Для оценки надежности классификации различных типов разрезов задавались для каждого типа по 20 вариантов значений петрофизических параметров продуктивной толщи. Результаты исследования на моделях показали, что алгоритм, основанный на нейронных сетях, достаточно надежно классифицирует различные типы геологического разреза – вероятность правильной классификации состави-



**Рис. 5.** Фрагменты волновых полей

**Fig. 5.** Fragments of wave fields

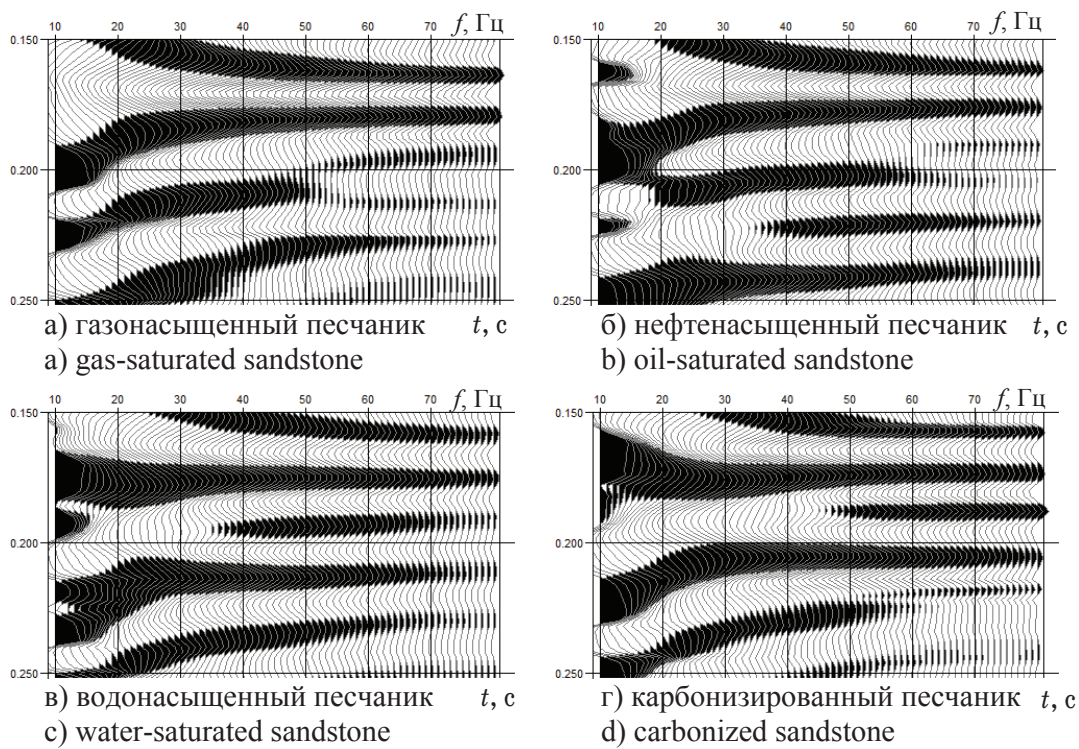


Рис. 6. ФАН-образы различных типов геологического разреза

Fig. 6. PTA-images of different types of geological section

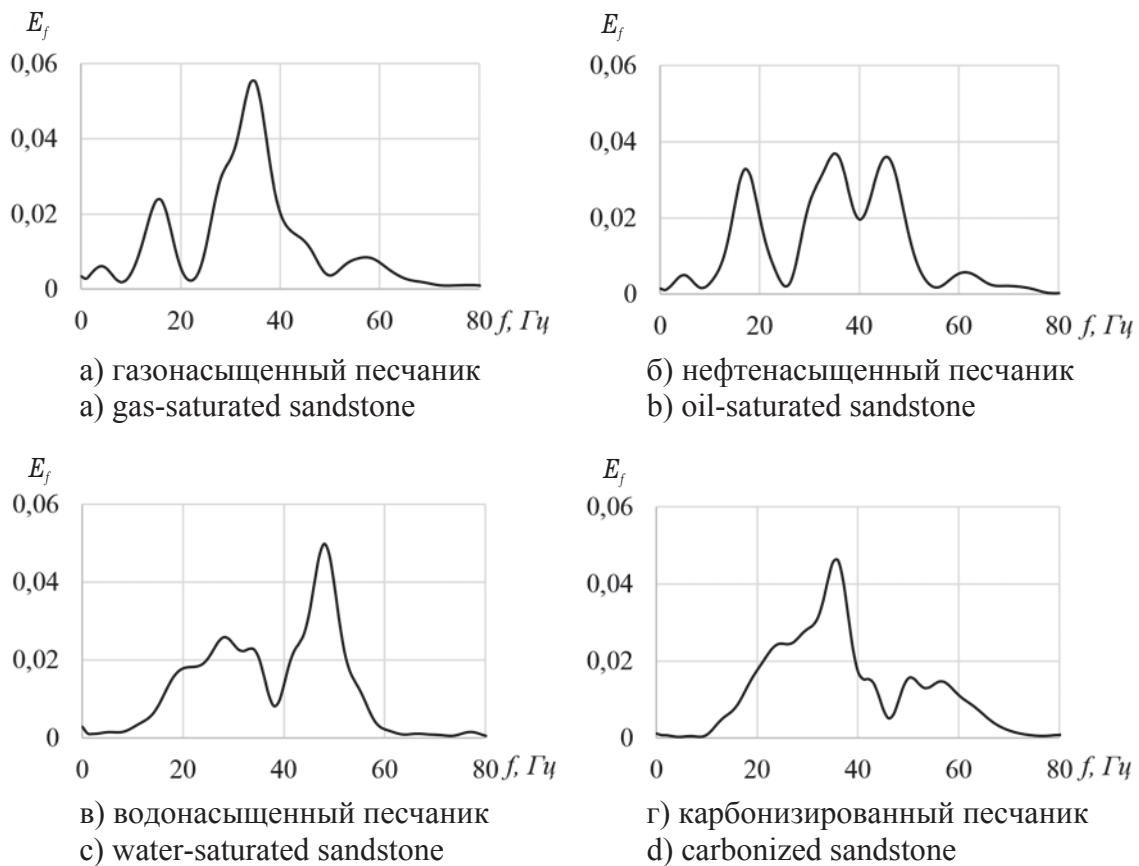


Рис. 7. Вектор признака  $E_f$  для различных типов геологического разреза

Fig. 7. Feature vector for different types of geological section



ла 88 %. Дискриминационная способность метода к-средних была несколько ниже, чем у нейронных сетей. Вероятность принятия правильного решения в этом случае составила 86,3 %.

С целью исследования устойчивости метода прогноза типов геологического разреза на основе ФАН-анализа было рассмотрено влияние нерегулярных помех на результаты классификации. При этом нерегулярная помеха формировалась в виде некоррелированного гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием, среднеквадратическое отклонение которого задавалось исходя из

$$\text{требуемого отношения сигнала к шуму: } \delta = \frac{A}{\sigma_{\xi}}.$$

Эксперимент проводился путем статистического моделирования на ЭВМ, при котором для каждого задаваемого отношения сигнала к шуму объем выборки составлял 50 наблюдений. Рассматривались значения отношения сигнала к шуму, которые, как правило, обеспечиваются после проведения стандартных процедур обработки волновых сейсмических полей. Исследования показали, что предлагаемый алгоритм прогноза обладает достаточно высокой помехоустойчивостью. Так, для отношения сигнала к шуму  $\delta=5$  при доверительной вероятности 0,95 вероятность правильной классификации типов разреза при использовании нейронных сетей составила 0,81.

#### Обработка и интерпретация реальных данных

Опробование предложенного алгоритма прогноза типов геологического разреза проводилось на материалах метода общей глубинной точки (ОГТ), полученных на ряде месторождений нефти Томского приобья. Алгоритм прогноза также применялся при обработке данных вертикального сейсмического профилирования (ВСП), зарегистрированных при исследовании 9 разведочных скважин [21].

В качестве примера кратко рассмотрим последние результаты обработки материалов ОГТ, полученные при проведении площадных наблюдений (3D сейсморазведка) на Конторовичском нефтяном месторождении. Основным продуктивным горизонтом на данном месторождении являются отложения верхней Юры, характеризующиеся тонкослоистой структурой. В связи с этим рассматривалась толща, ограниченная подошвой Баженовской свиты и кровлей Тюменской свиты. Исходными материалами для обработки служили разрезы ОГТ, полученные для вертикальных сечений временного куба 3D. С целью повышения надежности выделения отражающих границ в области анализируемой продуктивной толщи по данным временных разрезов ОГТ предварительно были построены объектно-ориентированные разрезы по данным ФЧП. На рис. 8 показаны фрагменты разреза ОГТ и полученного разреза ФЧП для одного из сечений куба 3D. Сопоставление временных разрезов ОГТ и объектно-ориентированных фазовых разрезов (рис. 8) показало, что применение ФЧП значительно улучшает разрешение волн в области их интерференции, а также позволяет выделять и проследить слабые по интенсивности отраженные волны. Полученные количественные оценки отношения сигнал/шум показали, что сигнал (отражения от целевых горизонтов) на разрезах ФЧП по амплитуде выше уровня шума в 8–10 раз, что является, как известно, вполне приемлемым для решения структурных задач.

На объектно-ориентированных разрезах (разрезы ФЧП, рис. 8, б) по сравнению с разрезами ОГТ (рис. 8, а) более отчетливо проявляются различные неоднородности исследуемого геологического разреза.

Построенные разрезы ФЧП позволили уточнить временной интервал для проведения ФАН-анализа в области продуктивной толщи. По результатам ГИС и испытаниям пробуренных на ме-

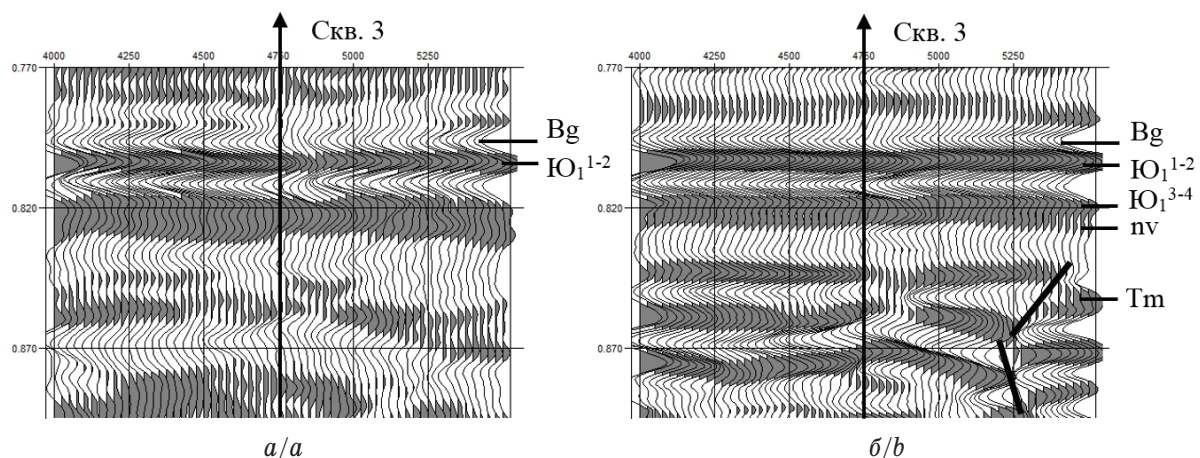


Рис. 8. Фрагменты разрезов ОГТ (а) и ФЧП (б);  $\blacktriangleright$  – тектоническое нарушение

Fig. 8. Fragments of sections of CDP (a) and PFC (b);  $\blacktriangleright$  tectonic disturbance

**Таблица 3.** Полученные характеристики ГИС и результаты испытания скважин для пласта Ю<sub>1</sub>

**Table 3.** Received characteristics of well logging and well test results for the strata Yu<sub>1</sub>

Номер скважин Number of a well	Пласты Strata	Эффективная толщина, м Effective thickness, m	Коэффициент пористости, % Porosity coefficient of, %	Коэффициент проницаемости, мД Permeability coefficient, mD	Дебит скважины, м <sup>3</sup> /с Well debit, m <sup>3</sup> /s
1	Ю <sub>1</sub> <sup>1</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>1</sup> )	2,8	10,2	2,6	Нефть (Oil) 0,67
	Ю <sub>1</sub> <sup>2</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	6,8	12,1	9,97	
2	Ю <sub>1</sub> <sup>1</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>1</sup> )	2,8	15,0	2,85	Вода (Water) 5,8
	Ю <sub>1</sub> <sup>2</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	2,6	15,3	6,48	Не испытана (Not tested)
3	Ю <sub>1</sub> <sup>1</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>1</sup> )	1,9	14,6	2,93	Нефть (Oil) 16,2
	Ю <sub>1</sub> <sup>2</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	5,1	15,0	4,58	Нефть (Oil) 15,0
4	Ю <sub>1</sub> <sup>1</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>1</sup> )	2,8	15,9	9,93	Нефть (Oil) 4,6
	Ю <sub>1</sub> <sup>2</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	2,5	15,4	13,96	
5	Ю <sub>1</sub> <sup>1</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>1</sup> )	2,4	14,3	2,39	Нефть (Oil) 9,3
	Ю <sub>1</sub> <sup>2</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	5,4	16,7	16,0	
6	Ю <sub>1</sub> <sup>1</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>1</sup> )	2,4	14,6	2,75	Нефть (Oil) 10,67
	Ю <sub>1</sub> <sup>2</sup> (Yu <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	5,0	13,8	1,69	

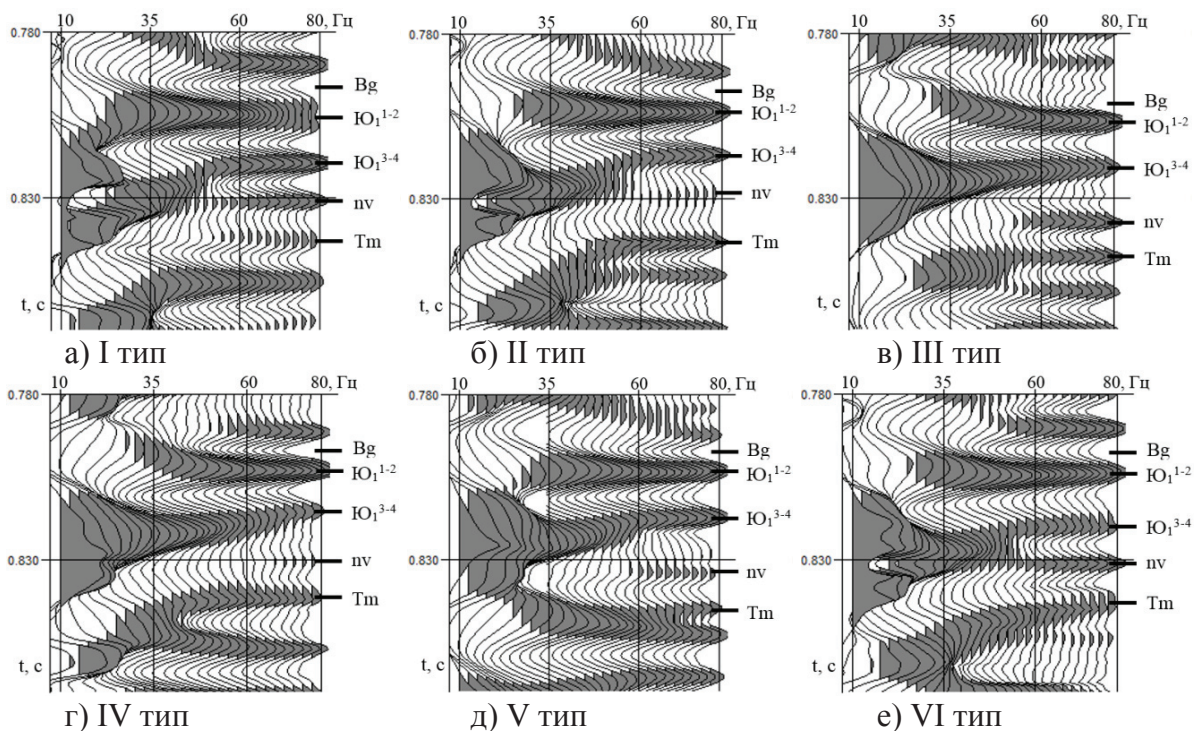
сторождении разведочных скважин (табл. 3) были выделены шесть типов геологического разреза, различающихся эффективными толщинами, по-

ристостью, проницаемостью и дебитом пластовых флюидов.

Для сейсмотрасс, соответствующих положениям скважин, были определены ФАН-образы и рассчитаны для них отмеченные выше информативные параметры. Проведенный анализ полученных ФАН-образов (рис. 9) показал, что они имеют значимые различия, что позволяет их использовать в качестве эталонных при классификации типов разрезов в межскважинном пространстве.

Далее для суммотрасс, зарегистрированных на различных пикетах наблюдения межскважинного пространства, были получены ФАН-образы и построены разрезы ФАН-Г (рис. 10).

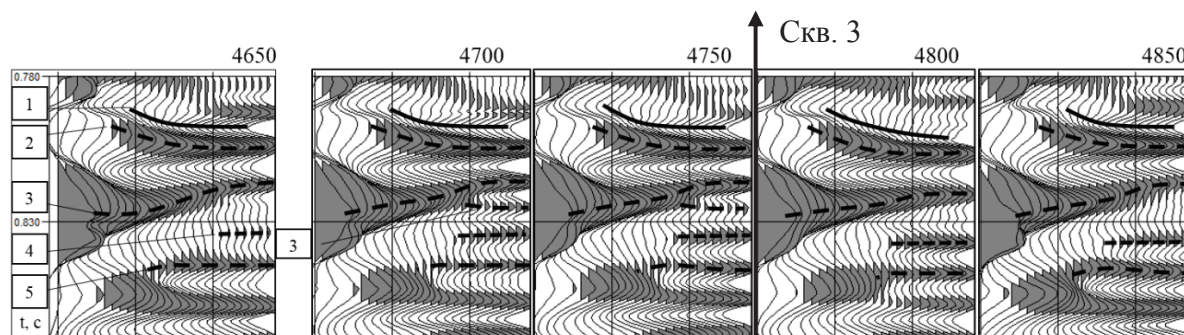
В соответствии с вышерассмотренной методикой прогноза осуществлялась классификация полученных ФАН-образов и картирование выделенных типов разрезов по анализируемой площади. Для автоматической классификации типов разреза использовался алгоритм, основанный на нейронных сетях. Комплексная интерпретация полученных результатов прогноза с привлечением структурных построений и геологических материалов позволила выделить распространение продуктивных типов разреза и дать рекомендации по бурению эксплуатационных скважин. Следует отметить, что на Конторовичском месторождении ранее уже были пробурены 5 эксплуатационных скважин, данные о которых не были использованы при проведении прогноза. Проведенный анализ показал, что расположение четырех из пяти сква-



**Рис. 9.** Эталонные ФАН-образы

**Fig. 9.** Reference FTA-images





**Рис. 10.** Фрагмент разреза ФАН-Г: 1 – подошва баженовской свиты (Bg); 2 – пласт  $Yu_1^{1-2}$  васюганской свиты; 3 – пласт  $Yu_1^{3-4}$  васюганской свиты; 4 – нижневасюганская подсвита (nv); 5 – кровля тюменской свиты (Тм)

**Fig. 10.** Fragments of section PTA-G. 1 is the sole of the Bazhenov suite (Bg); 2 is the stratum  $Yu_1^{1-2}$  of the Vasyugan suite; 3 is the stratum  $Yu_1^{3-4}$  of the Vasyugan suite; 4 is the lower Vasyugan subsuite (nv); 5 is the roof of the Tyumen suite (Tm)

жин хорошо согласуется с прогнозными зонами распространения продуктивных типов разреза, построенными по предложенному алгоритму, что в определенной степени свидетельствует об эффективности его применения. Также, как уже отмечалось выше, предлагаемый метод прогноза ранее использовался при выборочной обработке данных на ряде других месторождений (Крапивинское, Болтное, Междуреченское) Томского приобья. По результатам обработки были выделены нефтеперспективные зоны, нашедшие подтверждение в результате последующего бурения скважин.

### Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм прогноза успешно прошел апробацию на модельных и реальных материалах и был включен в состав программно-алгоритмических комплексов «Геосейф» и «Геосейф-ВСП», предназначенных для детальной обработки данных наземной и скважинной сейсморазведки. Обработка материалов ОГТ подтвердила перспективность применения фазовременного анализа для прогноза типов геологического разреза в межскважинном пространстве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов Д.Н. Детальный прогноз геологического разреза в сейсморазведке. – М.: Недра, 2007. – 195 с.
2. Немова В.Д., Бордюг М.А., Ревяко А.В. Сейсмогеологическое моделирование изменений свойств отложений баженовской свиты в межскважинном пространстве // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 2. – С. 72–97.
3. Давыдова Е.А. Технология спектрально-временного прогнозирования типов геологического разреза по данным сейсморазведки, бурения и ГИС: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004. – 206 с.
4. Istekova S.A, Umirova G.K. Characteristics of Seismic Data Used to Study the Reservoir of South Torgay Oil and Gas Basin // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2014. – V. 3. – Iss. 11. – P. 17382–17394.
5. Самаркин М.А. Теоретическое и модельное обоснование методики определения типов геологического разреза переменной толщины в межскважинном пространстве // Журнал Геофизика. – 2003. – Специальный выпуск. – С. 85–89.
6. Новая методика регионального прогноза высокопродуктивных баженовских коллекторов Западной Сибири / Е.А. Копилевич, М.Б. Скворцов, Н.Д. Сурова, Г.В. Кузнецов // Геология нефти и газа. – 2016. – № 4. – С. 58–63.
7. Мушин И.А., Лисунова О.В., Копилевич Е.А. Методики спектрально-временного прогнозирования типов геологического разреза // Геофизика. – 2008. – № 3. – С. 22–27.
8. Худзинский Л.А. Об определении некоторых параметров однородных слоев по их фазовым спектральным характеристикам // Изв. АН СССР. Физика земли. – 1996. – № 5. – С. 68–77.
9. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-Consistent Sparse Multichannel Blind Deconvolution of Seismic Signals // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2016. – V. 54. – P. 3200–3207.
10. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis / V.P. Ivanchenkov, O.N. Vylegzhanin, O.V. Orlov, A.I. Kochegurov // Proc. 9<sup>th</sup> Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS-2005. – Novosibirsk, 2005. – V. 1. – P. 159–162.
11. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium processing // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – V. 342. – P. 27–36.
12. Bibi C. Aritman. Repeatability study of seismic source signatures // Geophysics. – 2001. – V. 66. – № 6. – P. 1811–1817.
13. Schimmel M., Paulssen H. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks // Geophys. J. Int. – 1997. – V. 130. – P. 497–505.
14. Gelchinsky B., Landa E., Shtivelman V. Algorithms of phase and group correlation // Geophysics. – 1985. – V. 50. – P. 596–608.
15. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Нгуен Суан Хунг. Прогноз коллекторских свойств пород на основе взаимных фазовых спектров отраженных сейсмических волн // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 5. – С. 24–28.
16. Авербух А.Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. – М.: Недра, 1982. – 232 с.
17. Авербух А.Г., Трапезникова Н.А. Отражение и преломление плоских волн при нормальном падении на границу поглощающих сред // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1972. – № 9. – С. 74–83.
18. Разин А.В. Методика детального определения акустических и коллекторных свойств горных пород по данным сейсморазведки

- ки: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1999. – 175 с.
19. Дюран Б., Оддел П. Кластерный анализ. – М.: Статистика, 1977. – 185 с.
20. Haykin S. Neural Networks: a Comprehensive Foundation. 3<sup>rd</sup> Edition. – Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 2007. – 906 p.
21. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Применение методов фазочастотного анализа сейсмических волн для изучения околоскважинного пространства // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 58–63.

*Поступила 21.03.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Иванченков В.П.**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кочегуров А.И.**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Нгуен Суан Хунг**, аспирант кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Орлов О.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 550.834

## PREDICTING GEOLOGICAL SECTION TYPES BASED ON THE PHASE-TEMPORAL ANALYSIS OF SEISMIC OBSERVATIONS DATA

**Viktor P. Ivanchenkov<sup>1</sup>,**

kaicc@tpu.ru

**Alexander I. Kochegurov<sup>1</sup>,**

kaicc@tpu.ru

**Nguyen Xuan Hung<sup>1</sup>,**

hungnx@tpu.ru

**Oleg V. Orlov<sup>1</sup>,**

orloff.oleg@mail.ru

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

**The relevance of the study.** Currently, to solve the geological section prediction problems, including the prediction of sedimentation mass of oil and gas potential, based on the seismic observations data, the dynamic characteristics of reflected waves, directly related to their amplitude and energy, are widely used as diagnostic features. Until recently, the information on the phase-frequency characteristic properties was used little if at all. Meanwhile, the seismic response phase, in particular a complex pattern of change of their phase spectra, contains information on location of reflecting boundaries of the analyzed rock mass, the absorbing and dispersion properties of the bedded absorptive structure. Therefore, phase-frequency characteristics of reflected waves can serve as important diagnostic features for predicting sedimentation mass of oil and gas potential.

**The aim** of the study is to develop algorithm for predicting and mapping the geological section types based on the phase-temporal analysis of the seismic records; to explore the reliability of the algorithm on the models of geological structures and test its application to processing and interpreting the data from the common depth point method at the Kontorovichsky oil field.

**The methods used in the study:** the digital processing of spatiotemporal signals and field, methods of discrete Fourier transform, mathematical modeling and computer experiment.

**The results.** The authors showed the possibility of extracting useful information from the phase-frequency characteristics of seismic signals for diagnostic features formation at geological section prediction. Based on the selected features, the method of phase-temporal seismic records analysis was developed and the algorithm for forecasting and mapping the geological section types was built. The developed algorithm was studied on the models of bedded absorptive structure, experimental processing and interpreting real data. The results obtained confirmed the prospects of applying phase-temporal analysis for predict the geological section types in inter-well space.

### Key words:

Forecast of types of a geological section, method of the phase-temporal analysis, algorithms of phase-frequency tracing of seismic waves, interborehole space.

### REFERENCES

- Krylov D.N. *Detalny prognoz geologicheskogo razreza v seysmorazvedke* [Detailed forecast of a geological section in seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 2007. 195 p.
- Nemova V.D., Bordyug M.A., Revyako A.V. Seismogeological modeling of changes of properties of the Bazhenov shale deposits in interborehole space. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2013, vol. 2, pp. 72–97. In Rus.
- Davydova E.A. *Tekhnologiya spektralno-vremennogo prognozirovaniya tipov geologicheskogo razreza po dannym seysmorazvedki, bureniya i GIS*. Dis. Dokt. nauk [Technology of spectral and time forecasting of types of a geological section according to seismic exploration, drilling and GIS. Dr. Diss.]. Moscow, 2004. 206 p.
- Istekova S.A., Umirova G.K. Characteristics of Seismic Data Used to Study the Reservoir of South Torgay Oil and Gas Basin. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2014, vol. 3, Iss. 11, pp. 17382–17394.
- Samarkin M.A. Theoretical and model reasons for a technique of determining the types of geological section with different thickness in interborehole space. *Zhurnal geofizika*, 2003, Special Issue, pp. 85–89. In Rus.
- Kopilevich E.A., Skvortsov M.B., Surova N.D., Kuznetsov G.V. New technique of regional forecast of highly productive Bazhenov collectors in Western Siberia. *Geologiya nefti i gaza*, 2016, no. 4, pp. 58–63. In Rus.
- Mushin I.A., Lisunova O.V., Kopilevich E.A. Techniques of spectral and time forecasting of types of geological section. *Geofizika*, 2008, no. 3, pp. 22–27. In Rus.
- Khudzinskiy L.A. Ob opredelenii nekotorykh parametrov odnorodnykh sloev po ikh fazovym spektralnym kharakteristikam [On determination of certain parameters of uniform layers by their phase spectral characteristics]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1996, no. 5, pp. 68–77.
- Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-Consistent Sparse Multichannel Blind Deconvolution of Seismic Signals. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2016, vol. 54, pp. 3200–3207.
- Ivanchenkov V.P., Vylegzhanin O.N., Orlov O.V., Kochegurov A.I. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis. *Proc. 9<sup>th</sup> Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS-2005*. Novosibirsk, 2005, vol. 1, pp. 159–162.
- Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium

- um processing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, vol. 342, pp. 27–36.
12. Bibi C. Aritman. Repeatability study of seismic source signatures. *Geophysics*, 2001, vol. 66, no. 6, pp.1811–1817.
  13. Schimmel M., Paulssen H. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks. *Geophys. J. Int.*, 1997, 130, pp. 497–505.
  14. Gelchinsky B., Landa E., Shtivelman V. Algorithms of phase and group correlation. *Geophysics*, 1985, vol. 50, pp. 596–608.
  15. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Nguyen X.H. Prediction of reservoir properties of rocks based on mutual phase spectrums of reflected seismic waves. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 5, pp. 24–28. In Rus.
  16. Averbukh A.G. *Izucheniye sostava i svoystv gornykh porod pri seysmorazvedke* [Studying structure and properties of rocks at seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 232 p.
  17. Averbukh A.G., Trapeznikova N.A. Otrazheniye i prelomleniye ploskikh voln pri normalnom padenii na granitsu pogloshchayushchikh sred [Reflection and refraction of flat waves at normal falling on border of the absorbing environments]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1972, no. 9, pp. 74–83.
  18. Razin A.V. *Metodika detalnogo opredeleniya akusticheskikh i kolektornykh svoystv gornykh porod po dannym seysmorazvedki*. Dis. Kand. nauk [Technique of detailed definition of acoustic and collector properties of rocks according to seismic exploration. Cand. Diss.]. Tomsk, 1999. 175 p.
  19. Dyuran B., Odell P. *Klasterny analiz* [Cluster analysis]. Moscow, Statistika Publ., 1977. 185 p.
  20. *Simon Haykin, Neural Networks: Prentice-Hall Inc. Comprehensive Foundation* (3rd Edition). Upper Saddle River, NJ, 2007. 906 p.
  21. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Orlov O.V. Methods of phase-frequency analysis of seismic waves and their application in studying borehole environment. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2015, no. 10, pp. 58–63. In Rus.

Received: 21 March 2017.

#### Information about the authors

**Viktor P. Ivanchenkov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

**Nguyen Xuan Hung**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Oleg V. Orlov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

ББК 65в6 + 06

## КАЧЕСТВЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ НЕФТЕДОБЫЧИ

Шевкунов Николай Олегович<sup>1</sup>,  
shevkunov-no@mail.ru

Жигунова Анна Викторовна<sup>1</sup>,  
ann-rgu@yandex.ru

Шевкунова Анастасия Владимировна<sup>1</sup>,  
nastya3051990@mail.ru

<sup>1</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения,  
Россия, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2.

**Актуальность работы** обусловлена тем, что, учитывая внешние факторы неопределенности, такие как риск, изменение стоимости денег в течение времени в зависимости от альтернативной стоимости капитала, упущенной выгоды, стоимости отложенного потребления и ожидания отдачи капитала при расчете эффективности инвестиционных проектов, повышается качество оценки экономической целесообразности проектов. Анализируя исследования отечественных ученых и опыт передовых компаний нефтегазового комплекса, следует отметить, что, учитывая сложившуюся рыночную ситуацию и исходя из рисковости природы большинства инвестиционных проектов, проблемы необоснованного или поспешного планирования не являются обособленными и исходят из неэффективного механизма прогнозирования реализации проектов по разведке, добыче и транспортировке георесурсов. Появляется реальная возможность провести анализ сценария развития и перспективы реализации идеи в изменяющихся рыночных тенденциях, спрогнозировать и спланировать действия и ресурсы с использованием более совершенного финансово-экономического аналитического инструментария. Научно обоснованная и выверенная модель инвестиционной оценки может оказать решающее влияние на создание, сохранение и развитие инновационных преимуществ развивающихся предприятий нефтедобычи в конкурентной борьбе.

**Цель работы:** решение проблемы ошибочных результатов в сфере прогнозирования и оценки инвестиционных проектов по разведке, добыче и транспортировке георесурсов. Эти результаты связаны с уменьшением расчетной величины расходов при существовании отрицательных потоков денежных средств на протяжении жизненного цикла и неадекватном учете риска и упущенной выгоды, с занижением значений чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы доходности, индекса доходности дисконтированных затрат и с завышением значения дисконтированного периода окупаемости при использовании геометрической прогрессии и дисконтировании чистого дохода, а не наращенной суммы.

**Методы исследования:** методы наблюдения и сбора фактов по современным проблемам функционирования предприятий нефтегазового комплекса и проблемам оценки эффективности инвестиционных проектов нефтедобычи; анализ отдельных элементов оценочного инструментария инвестиционных проектов; сравнительный анализ финансово-математического и проектно-инвестиционного подходов; синтез итогового результата оценки экономической эффективности проекта.

**Результаты.** В результате проведения качественной трансформации методов оценки экономической эффективности инвестиционных проектов, во-первых, решена проблема дисконтирования отрицательных денежных потоков путем применения этой операции с учетом требований и законов финансовой математики к наращенной сумме капитала, а не к чистому доходу, который, в соответствии с базовыми принципами финансовых вычислений, дисконтировать недопустимо. Во-вторых, решен вопрос учета альтернативной стоимости, а также риска, как негативного фактора, в структуре математического аппарата методов оценки эффективности инвестиционных проектов. В-третьих, обоснована экономическая нецелесообразность использования механизма геометрической прогрессии при дисконтировании потоков денежных средств реального инвестиционного проекта, так как прирост капитала в реальном инвестиционном проекте не имеет геометрической прогрессии, как в случае со сложными процентами в финансовой математике, а также оттоки денежных средств, связанные с риском, не растут геометрически.

### Ключевые слова:

Методы оценки инвестиционных проектов, норма дисконта, факторы дисконтообразования, притоки и оттоки денежных средств, цикл инвестиционного проекта, разведка, добыча и транспортировка георесурсов.

### Введение

Эффективное функционирование нефтегазового комплекса в России способствует наращиванию социально-экономического потенциала отдельных регионов и отраслей промышленного производства, формируя при этом до 50 % федерального бюджета. Современные формы функционирования и развития нефтегазового комплекса РФ складываются с учетом особенностей взаимосвязей и взаимозависимостей между экономическим развитием комплекса и состоянием спроса на энергоносители. Особенность нефтегазового комплекса РФ со-

стоит в том, что основная доля производства приходится на первичную переработку нефтепродуктов и осуществляется на устаревшей технико-технологической базе. Кроме того, тенденции протекционизма, преобладающие в современных экономических отношениях, создают значительные риски для развития рынков энергоносителей [1, 2]. Стратегические приоритеты развития нефтегазового комплекса РФ, и в частности его инфраструктуры, непосредственно зависят от уровня конкурентоспособности смежных с нефтегазовым транспортным и промышленным комплексов. иннова-

ционный потенциал нефтегазового комплекса РФ имеет стратегический характер и является основным фактором, позволяющим справиться с влиянием недостающих производственных факторов и повысить эффективность экономики в целом [3].

Российская Федерация имеет значительные запасы энергетических ресурсов. На территории нашей страны сосредоточена одна треть мирового запаса природного газа, 10 % нефти, 14 % урана, угля – более 20 %. Энергетика в настоящее время является одной из стабильно работающих производственных отраслей в экономике России. Многие отрасли промышленного производства становятся постоянными потребителями энергоресурсов, которые вырабатываются топливно-энергетическими комплексами страны, и полностью зависят от состояния и развития данных комплексов [4].

Наиболее значимыми топливно-энергетическими ресурсами для данных отраслей являются дизельное топливо, мазут, газ, т. е. продукты нефтеперерабатывающего комплекса. В общей сумме они составляют 95 % всего энергобаланса отдельных промышленных производств и 93 % финансовых затрат, которые идут на приобретение энергоресурсов. При этом стабильная и качественная работа таких производств зависит от многих показателей, основным из которых является качественное энергообеспечение производственного процесса [5].

Условия глобализации и развитие общемировой конкуренции в нефтегазовом секторе на фоне сокращения запасов минерального сырья требуют разработки и развития современных технологий, направленных на формирование устойчивого, инновационного восприимчивого, динамически развивающегося и экономически эффективного нефтегазового комплекса РФ. Для этого нефтегазовые компании страны осуществляют финансирование новых проектов по разработке и добыче энергетических ресурсов, несмотря на проблемы общего характера, возникающие в экономике страны, и общемировое снижение цен на нефтегазовые ресурсы. Такие проекты повсеместно связаны с такими проблемами, как несоблюдение сроков реализации проектов и превышение запланированного бюджета [6]. Зачастую при прогнозировании, планировании и реализации инвестиционного проекта следует организовать деятельность по следующим основным направлениям:

- стандартизация процессов и используемых технологий с целью повышения качества реализуемого проекта;
- экспертная поддержка проектных решений;
- обобщение, исследование и освоение новых для данной отрасли технологий;
- компетентностно-квалификационная подготовка технического персонала;
- координация направлений деятельности в тесном взаимодействии с производителями и поставщиками оборудования и технологий, а также образовательными и исследовательскими

организациями, как в России, так и за рубежом.

Реализация подобных проектов, как правило, сопряжена с проблемами, возникающими вследствие либо неэффективного распределения ответственности за принятие и реализацию стратегических и операционных решений, особенно при реализации совместных с иностранными партнерами проектов, либо непродуманного или поспешного планирования, учитывающего только оптимистический вариант развития ситуации относительно необходимых ресурсов, сроков и возможностей, либо неэффективности закупочных и логистических процедур [7].

К современным проблемам предприятий нефтегазового комплекса можно отнести геолого-географические, технико-технологические и финансово-экономические. В контексте данной статьи мы основной упор сделаем на финансово-экономические проблемы функционирования нефтегазового комплекса РФ. Основной проблемой на данном поприще становится отток внешних иностранных инвестиций вследствие ужесточения государственного регулирования и контроля в данной сфере в силу усиления санкций отдельными государствами и, как ответные меры, введение в данной сфере ограничений для иностранного бизнеса. Морально и физически устаревшее оборудование, используемое предприятиями нефтегазового комплекса, влечет за собой рост затрат на разработку месторождений и строительство скважин, а также значительно повышает, по сравнению с иностранными производителями, себестоимость добычи углеводородов. Несогласованность целей головных нефтедобывающих компаний и их дочерних подразделений приводит к тому, что нарушаются пропорции в соотношении риска и доходности по схожим проектам, что в свою очередь снижает экономическую эффективность функционирования отрасли в целом [8]. В условиях возникшего кризиса в России значительно снизились затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, предусматривающие детальную проработку бизнес-процессов по прогнозированию и планированию инвестиционных проектов по разведке, добыче и транспортировке георесурсов на ранних этапах во избежание возникновения дорогостоящих изменений на стадии реализации [9]. В этом контексте наиболее значимой проблемой компаний нефтегазового сектора экономики при прогнозировании, планировании и реализации инвестиционных проектов по разведке, добыче и транспортировке георесурсов становится формирование качественно нового оценочного инструментария.

#### Анализ основных научных проблем исследования

Стратегическое управление инвестициями в инновации включает в себя комплекс действий, неотъемлемой составляющей которого является процесс экономической оценки эффективности проектов. В мировой практике главными метода-



ми оценки эффективности инвестиционных проектов являются: чистый дисконтированный доход, внутренняя норма доходности, дисконтируемый период окупаемости, дисконтированные индексы рентабельности инвестиций [10]. Дисконтирование по классической схеме непогрешимо работает в финансовой математике, а в математическом инструментарии, разработанном для оценки инвестиционных проектов, дает серьезные сбои, например, при отрицательных значениях потоков денежных средств на протяжении жизненного цикла инвестиционного проекта, завышенных и нескольких значениях внутренней нормы доходности, неадекватном учете риска и др., что ставит под угрозу научную обоснованность в принятии экономически целесообразных управленческих решений. При оценке капиталоемких проектов ошибки в результатах расчетов составляют миллионы и миллиарды рублей [11].

Научная новизна исследования состоит в качественной трансформации методов оценки эффективности инновационно-инвестиционных проектов с учетом основополагающих принципов финансов и финансовой математики, рисков и упущенной выгоды, а также обосновании выбора критериев при формировании ставки дисконтирования.

При расчетах эффективности инвестиционных проектов известными методами дисконтированного периода окупаемости, индексов доходности дисконтированных затрат и инвестиций, чистого дисконтированного дохода и внутренней нормы доходности возникают следующие проблемы [12, 13].

Во-первых, при отрицательных потоках денежных средств на протяжении жизненного цикла инвестиционного проекта и соответственно дисконтировании этих оттоков происходит уменьшение их величины, т. е., по сути, ничем не обоснованное уменьшение расчетной величины расходов по проекту.

Во-вторых, при учете риска путем поправки нормы дисконта на соответствующую величину и при делении на увеличенный коэффициент дисконта притоков и оттоков денежных средств происходит уменьшение как притоков, так и оттоков, что в случае с уменьшением оттоков денежных средств свидетельствует об учете риска как благоприятного фактора. Это противоречит концепции учета риска, так как риск – это вероятность наступления неблагоприятного события, которое повлечет за собой потери денежных средств.

В-третьих, структура математического аппарата исследуемых методов оценки эффективности реальных проектов отличается от инструментария, применяемого в финансовой математике для портфельных вложений. Происходит подмена понятия дисконтируемой наращенной суммы, используемой в финансовой математике, понятием чистого дисконтированного дохода в инвестиционном проектировании. Эти понятия совершенно отличаются друг от друга по содержанию, предназначению, функции и роли и количественно, и качественно.

В-четвертых, с позиции финансовой математики дисконтирование неуклонно должно следовать базовому принципу финансов, который повышает ценность сегодняшних денежных эквивалентов над будущими. Но ценность сегодняшних денежных единиц превосходит ценность будущих, поскольку именно сегодня есть шанс вложить эти средства в финансовые инвестиции, например открыть депозит в банке, и получить гарантированный соответствующий доход в виде процентов. Следовательно, в финансовой математике используется механизм геометрической прогрессии с учетом прироста процентов и дисконтируется наращенная сумма, что не противоречит логике. В методическом инструментарии по оценке эффективности инвестиционных проектов дисконтируется прирост (чистый доход), а не в целом наращенная сумма. Более того, используется механизм геометрической прогрессии, что недопустимо, так как прирост капитала в реальном инвестиционном проекте не имеет геометрической прогрессии и риск также не растет геометрически. Таким образом, существенно занижается уровень полученных значений, и эффективный реальный инвестиционный проект становится менее привлекательным, а в каких-то случаях и убыточным.

Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов как в версии, утвержденной государственными органами в 1999–2000 гг., так и в более совершенной версии рекомендаций 2008 г., которая не нашла государственной поддержки и остается до сих пор неутвержденной, установлено, что поток денежных средств инвестиционного проекта следует рассматривать как совокупность положительных и отрицательных денежных потоков по трем видам деятельности [14, 15]. Актуальной с нашей точки зрения является научная проблема создания целостной картины взаимоувязки и взаимозависимости потоков денежных средств по финансовой, инвестиционной и операционной деятельности не только между собой, но и с учетом формирования, движения, прироста и наращивания инвестиционного капитала в целом.

#### **Формирование и взаимозависимость потоков денежных средств по инвестиционному проекту**

Определяющим показателем для любого проекта является сформированный для его реализации инвестиционный капитал. Рассмотрим его состав и структуру. Самое простое определение: инвестиционный капитал – это капитал, вложенный в инвестиции [16]. Рассматривая реальный инвестиционный проект сквозь призму зарубежных и отечественных методических рекомендаций, следует отметить, что основу инвестиционного капитала формирует поток денежных средств по инвестиционной деятельности, в который входят соответственно оттоки и притоки. Отток денежных средств по инвестиционной деятельности формируется капитальными вложениями в основные

фонды, в первоначальную стоимость которых входят: цена завода изготовителя, затраты на транспортировку, монтаж, запуск и наладку. Затраты на ликвидацию и их замену также учитываются в виде оттока средств. Следует отметить, что капитальные вложения, носящие единовременный характер, могут осуществляться на протяжении всего горизонта прогнозирования и планирования. К потоку денежных средств по инвестиционной деятельности относятся вложения в первоначальный оборотный капитал и его изменения. Приток денежных средств по инвестиционной деятельности формируется за счет реализации основных фондов как в течение всего проекта, так и в завершающей фазе. Таким образом, поток денежных средств по инвестиционной деятельности включает в себя вложения в основные фонды и первоначальный оборотный капитал.

Изменение совокупного инвестиционного капитала зависит от потока денежных средств по операционной деятельности. Оттоками в данном случае являются текущие расходы, связанные с процессом производства продукции, оказания услуг, выполнения работ. Выручка от их реализации является основой притока денежных средств по операционной деятельности.

Источником средств и для операционной, и для инвестиционной деятельности реального инвестиционного проекта является финансовый капитал, а точнее приток денежных средств по финансовой деятельности. Отток денежных средств по финансовой деятельности (выплаты процентов по кредитам и дивидендов по акциям) рекомендуем учитывать отдельно [17].

Исходя из вышесказанного, подведем некий промежуточный итог. Инвестиционный капитал – это совокупность оттоков и притоков денежных средств по инвестиционной и операционной деятельности, которые первоначально начинают осуществляться благодаря притоку денежных средств по финансовой деятельности.

Значение величины инвестиционного капитала прогнозируется, а затем планируется. Причем оттоки в большей степени планируются, а притоки капитала носят прогнозный, вероятностный, характер [18]. Отток денежных средств по операционной деятельности по факту реализации продукции, работ, услуг в виде их себестоимости вместе с прибылью формирует приток по тому же виду деятельности, который является по смысловой части наращенным инвестиционным капиталом. Схема формирования, движения и прироста капитала по инвестиционному проекту показана на рисунке.

Таким образом, приростом инвестиционного капитала реального инвестиционного проекта является прибыль и амортизация, а наращенный инвестиционный капитал является притоком денежных средств по операционной деятельности. Оборот замыкается возвращением средств в основной и оборотный капитал с помощью притоков денежных средств по операционной и инвестиционной деятельности [19].

Каждый текущий период реального инвестиционного проекта является аналогом текущего периода банковского вклада, когда годовые текущие расходы реального проекта выступают в роли первоначальной суммы финансового проекта, а годовой доход реального проекта – в роли наращенной суммы финансового проекта [20].



Рисунок. Схема формирования, движения и прироста капитала по инвестиционному проекту

Figure. Scheme of formation, movement and growth of capital by investment project

При осуществлении реального инвестиционно-го проекта увеличивается объем денежных средств только по операционной деятельности за счет получения выручки от продажи товаров, выполнения работ, оказания услуг [21, 22].

Поэтому операция дисконтирования возможна только применительно к наращенной сумме денежных средств по операционной деятельности. Наращенной суммы по инвестиционной деятельности не существует, если только основные фонды не сдаются в аренду, принося тем самым доход. Возврат средств, вложенных в основные фонды, осуществляется путем амортизации и продажи основных фондов по остаточной стоимости [23, 24].

#### Трансформация методов оценки эффективности инвестиционных проектов

С учетом соблюдения основополагающих принципов финансов и законов финансовой математики, принципа учета направленности геометрической прогрессии согласно изменению стоимости денег во времени; принципа учета риска как вероятности возникновения неблагоприятного события [25]; принципа дифференциации дисконтирования притоков и оттоков денежных средств, упущенной выгоды, обоснования выбора критериев при формировании ставки дисконтирования [26] нами предлагаются следующие качественно трансформированные методы.

1. Норма доходности инвестиционного проекта.

$$RR = \sum_{t=1}^m \frac{(S_t - P_t \cdot C_t)}{P_t} > r,$$

где  $S_t$  – наращенный инвестиционный капитал во временной интервал  $t$ , равный притоку денежных средств по операционной деятельности (выручка от реализации товаров, работ, услуг);  $P_t$  – операционный инвестиционный капитал во временной интервал  $t$ , равный сумме оттоков денежных средств по операционной деятельности (текущих эксплуатационных затрат) (в отток входят: материальные затраты, заработная плата, страховые взносы, прочие затраты, налог на прибыль);  $RR$  – норма доходности инвестиционного проекта [27, 28];  $C_t$  – коэффициент вероятного увеличения оттока денежных средств по инвестиционному проекту на  $k$  %;  $t$  – текущий временной интервал;  $m$  – период прогнозирования.

2. Прирост инвестиционного капитала с учетом альтернативной ставки доходности.

$$IOC = \sum_{t=1}^m \left( \frac{S_t}{(1+r)} - P_t \cdot C_t \right) > 0,$$

где  $IOC$  – прирост инвестиционного капитала с учетом альтернативной ставки доходности;  $r$  – ставка дисконтирования, равная значению ставки альтернативного безрискового вложения (годовая ставка банковского депозита).

3. Период окупаемости первоначального инвестиционного капитала

$$T = \frac{IC \cdot m}{IOC + L} = \frac{IC \cdot m}{\sum_{t=1}^m (S_t(1+r)^{-1} - P_t) + L},$$

где  $T$  – период окупаемости первоначального инвестиционного капитала, наступающий, когда отток денежных средств по инвестиционной деятельности окупаются за счет прироста инвестиционного капитала, т. е. суммы чистых притоков денежных средств по операционной деятельности;  $IC$  – инвестиционный капитал (отток денежных средств по инвестиционной деятельности), равный вложениям в основной и оборотный капитал;  $L$  – сальдо ликвидационных доходов от продажи основных фондов по восстановительной стоимости и расходов по ликвидации, демонтажу и т. д.

4. Индекс рентабельности инвестиционного капитала.

$$PI = \frac{IOC + L}{IC} = \frac{\sum_{t=1}^m (S_t(1+r)^{-1} - P_t) + L}{IC},$$

где  $PI$  – индекс рентабельности инвестиционного капитала.

5. Альтернативная стоимость капитала, направленного на покупку основных средств и на образование оборотного капитала (отток денежных средств по инвестиционной деятельности). Ее значение предлагаем сравнивать со значением прироста инвестиционного капитала и рассчитывать по следующей формуле.

$$OCIC = \sum_{t=1}^m IC \cdot m \cdot r < \sum_{t=1}^m I_t,$$

где  $OCIC$  – альтернативная стоимость инвестиционного капитала (упущенная выгода по альтернативному вложению).

#### Заключение

Таким образом, предлагаемые трансформированные методы решают проблемы, связанные с дисконтированием отрицательных денежных потоков, с неадекватным учетом риска в структуре математического аппарата методов оценки эффективности инвестиционных проектов, с несоответствием принципам финансовой математики исследуемого расчетного инструментария, с недопустимостью использования механизма геометрической прогрессии при дисконтировании потоков денежных средств реального инвестиционного проекта. Применение в практике оценки эффективности инвестиционных проектов предлагаемых методов позволит с большей степенью достоверности и точности прогнозировать и оценивать эффективность инновационно-инвестиционных проектов и программ [29] по разведке, добыче и транспортировке георесурсов, что создаст предпосылки для формирования и укрепления устойчивого экономического роста в нефтедобывающей отрасли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опыт «Газпром нефти» применения системы оценки и управления стоимостью в проектах. URL: <http://www.pmssoft.ru/news/allnews/the-experience-of-gazprom-neft-application-evaluation-system-and-value-management-in-projects/> (дата обращения: 24.03.2017).
2. Лебедев А.С. Развитие методического обеспечения инвестиционного проектирования в нефтедобыче: дис.... канд. экон. наук. – Тюмень, 2002. – 187 с.
3. Кожухова О.С. Нефтегазовый комплекс России: состояние и направления развития // Вопросы экономики и права. – 2011. – № 7. – С. 174–177.
4. Коржубаев А.Г. Перспективы развития нефтегазового комплекса Восточной Сибири и Дальнего Востока // Регион: экономика и социология. – 2011. – № 2. – С. 193–210.
5. Овинникова К.Н. Современное состояние нефтегазового комплекса России и его проблемы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-neftegazovogo-kompleksa-rossii-i-ego-problemy> (дата обращения: 02.03.2017).
6. Добряков И.С. Основные направления и методы организационно-экономических изменений на предприятиях нефтегазовой отрасли // Вестник МГТУ. – 2010. – Т. 13. – № 1. – С. 192–198.
7. Гаврилюк Е.А. Оценка эффективности проектов обустройства нефтяных месторождений // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 8-1 (39). – С. 16–19.
8. Зейналов В.Р., Садигов Р.И. Методические положения экономической оценки эффективности инвестиционных проектов по освоению нефтегазовых объектов // Нефтепромышленное дело. – 2012. – № 5. – С. 54–55.
9. Асланов Н.М., Аскерова Ф.А. Оценка экономической эффективности при инвестициях освоения нефтяных месторождений // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2013. – № 11. – С. 14–20.
10. Гафарова С.Г., Эфендиева А.Т. Нефтяная стратегия азербайджана и методы анализа эффективности инвестиционных проектов // Европейский журнал социальных наук. – 2014. – № 7-1 (46). – С. 475–481.
11. Салчева С.С., Павловская А.В. Методика оценки экономической эффективности инвестиций в переработку нефти с учетом индекса доходности нельсона и механизма мультипликатора в сопряженных секторах экономики // Экономика и предпринимательство. – 2014. – № 4-2 (45-2). – С. 646–648.
12. Денисов М.Н., Поздняков Н.И. Внутренняя норма дохода и чистый дисконтированный доход как основные показатели экономической оценки проектов освоения месторождений полезных ископаемых // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2007. – № 4. – С. 58–60.
13. Emigh J. Net present value // Computerworld. – 1999. – V. 33. – № 30. – P. 52–56.
14. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов от 21.06.1999 N ВК 477 (2-ая ред.) // Минэкономика РФ, Минфин РФ, Госстрой РФ. – 271 с.
15. Hayward C. Net present value // Financial Management. – 2002. – V. 32 – P. 11–13.
16. Kogan A. The criticism of net present value and equivalent annual cost // Journal of Advanced Research in Law and Economics. – 2014. – V. 5. – № 1. – P. 15–22.
17. Ложкин О.Б. Системная ошибка концепции «net present value» // Системный анализ в экономике – 2014: Материалы III Международной научно-практической конференции. – М.: Центральный экономико-математический институт РАН, 2015. – С. 194–197.
18. Chen Ch., Li G., Reynolds A. Robust constrained optimization of short- and long-term net present value for closed-loop reservoir management // Society of Petroleum Engineers Journal. – 2012. – V. 17. – № 3. – P. 849–864.
19. Anthes G.H. Internal rate of return // Computerworld. – 2003. – V. 37. – № 7. – P. 32–35.
20. Шевкунов Н.О. Качественная трансформация метода внутренней нормы доходности инновационно-инвестиционного проекта // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т. 8. – № 4 (35). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/48EVN416.pdf> (дата обращения: 02.03.2017).
21. Ng E.-H., Beruvides M.G. Multiple internal rate of return revisited: frequency of occurrences // Engineering Economist. – 2015. – V. 60. – № 1. – P. 75–87.
22. Vrijland M.S.A. The future net present value of investment alternatives // AACE international transactions. – 2000. – P. RI81–RI85.
23. Makeев В.А., Шевкунов Н.О. Анализ интерпретированной смысловой нагрузки и характеристик внутренней нормы доходности // Эксплуатация морского транспорта. – 2015. – № 1 (74). – С. 57–61.
24. Berkovitch E., Israel R. Why the NPV criterion does not maximize NPV? // Review of Financial Studies. – 2004. – V. 17. – № 1. – P. 239–246.
25. Duque D.F.M., Diaz H.H.T. Investment decision analysis using net present value at risk (NPV at risk) // Revista Facultad de Ingenieria. – 2009. – № 49. – P. 199–213.
26. Шевкунов Н.О. Анализ компенсационных составляющих внутренней нормы доходности инвестиционного проекта // Транспорт-2016: Труды Международной научно-практической конференции. – Ростов н/Д: РГУПС, 2016. – С. 308–311.
27. Tang S.L., Tang H.J. The variable financial indicator IRR and the constant economic indicator NPV // Engineering Economist. – 2003. – V. 48. – № 1. – P. 69–73.
28. Шевкунов Н.О. Диагностика отечественных аналогов внутренней нормы доходности и ставки дисконтирования // Труды РГУПС. – 2014. – № 4. – С. 134–137.
29. Johnson D. NPV analysis and applications for competitive intelligence // Competitive Intelligence Magazine. – 2003. – V. 6. – № 3. – P. 45–51.

Поступила 28.03.2017 г.

## Информация об авторах

**Шевкунов Н.О.**, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики, учета и анализа Ростовского государственного университета путей сообщения.

**Жигунова А.В.**, доцент кафедры экономики, учета и анализа Ростовского государственного университета путей сообщения.

**Шевкунова А.В.**, инженер научно-исследовательской части Ростовского государственного университета путей сообщения.



BBK 65v6 + 06

## QUALITATIVE TRANSFORMATION OF ASSESSMENT METHODS OF INVESTMENT PROJECTS EFFICIENCY IN OIL PRODUCTION

Nikolay O. Shevkunov<sup>1</sup>,  
shevkunov-no@mail.ru

Anna V. Zhigunova<sup>1</sup>,  
ann-rgu@yandex.ru

Anastasiya V. Shevkunova<sup>1</sup>,  
nastya3051990@mail.ru

<sup>1</sup> Rostov State Transport University,  
2, square of Rostovsky Strelkovy Polk Narodnogo Opolcheniya, Rostov-on-Don, 344038, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the fact that, taking into account external uncertainties such as risk, change in the value of money over time depending on the alternative cost of capital, lost profit, cost of deferred consumption and expectation of return on capital when calculating the efficiency of investment projects, the quality of the economic feasibility assessment of projects is improving. Analyzing the research of domestic scientists and experience of leading companies in oil and gas industry, it should be noted that considering the current market situation and based on the risk nature of most investment projects, the problems of unjustified or hasty planning are not isolated, and come from inefficient forecasting tool for implementing project for exploration, production and transportation of geo-resources. There is a real opportunity to analyze the scenario and prospects of realization of the idea in changing market trends, predict and plan the actions and resources using more sophisticated financial and economic analytical tools. Scientifically based and validated model of investment evaluation can have a crucial influence on creation, preservation and development of the innovative advantages of developing oil production in the competitive struggle.

**The main aim** of the study is to solve the problem of erroneous results in the field of forecasting and assessment of investment projects for exploration, production and transportation of geo-resources. The results are associated with a decrease in the estimated expenditure with the existence of negative cash flows over the life cycle and inadequate considering the risk and loss of profit, with understatement of the value of net discounted income and internal rate of return, profitability index of discounted costs and with overstating the value of the discounted payback period when using geometric progression and the discounted value of net income, not accrued amounts.

**The methods used in the study:** methods of observation and collection of facts on modern problems of functioning of oil and gas companies and evaluation of investment projects efficiency of oil production; analysis of individual elements of the evaluation tool; comparative analysis of financial mathematics and project-investment approaches; synthesis of the final result of evaluating the economic efficiency of the project.

**The results.** As a result of qualitative transformation of evaluation methods for economic efficiency of investment projects, the authors have solved first of all the problem of discounting negative cash flows by applying this operation subject to the requirements and the laws of financial mathematics to the accrued amount of capital, not net income, which, in accordance with the basic principles of financial calculations discounting is unacceptable. Secondly, the authors solved the issue of accounting the opportunity cost and risk as a negative factor in the structure of the mathematical apparatus, methods of valuation of efficiency of investment projects. Third, the economic inadvisability of using the geometric progression mechanism when discounting cash flows of a real investment project is justified, as the capital gain in a real investment project does not have geometric progression, as in the case with a complex interest in financial mathematics, as well as the future cash outflows associated with the risk, does not grow geometrically.

### Key words:

Methods of evaluation of investment projects, discount rate, discount formation factors; inflows and outflows of funds, cycle of investment project, exploration, production and transportation of geo-resources.

### REFERENCES

1. *Opyt «Gazprom nefiti» primeneniya sistemy otsenki i upravleniya stoimostyu v proektakh* [«Gazprom Neft» experience in applying valuation and cost management in projects]. Available at: <http://www.pmssoft.ru/news/allnews/the-experience-of-gazprom-neft-application-evaluation-system-and-value-management-in-projects/> (accessed 24 March 2017).
2. Lebedev A.S. *Razvitie metodicheskogo obespecheniya investitsionnogo proektirovaniya v nefte dobyche*. Dis. Kand. nauk [Development of methodological support for investment design in oil production. Cand. Diss.]. Tyumen, 2002. 187 p.
3. Kozhukhova O.S. *Neftegazovyy kompleks Rossii: sostoyanie i napravleniya razvitiya* [Oil and gas complex of Russia: state and development trends]. *Voprosy ekonomiki i prava*, 2011, no. 7, pp. 174–177.
4. Korzhubaev A.G. *Perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa Vostochnoy Sibiri i Dalnego Vostoka* [Prospects for development of oil and gas complex of Eastern Siberia and the Far East]. *Region: ekonomika i sotsiologiya*, 2011, no. 2, pp. 193–210.
5. Ovinnikova K.N. *Sovremennoe sostoyanie neftegazovogo kompleksa Rossii i ego problem* [Modern state of oil and gas complex of Russia and its problems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-neftegazovogo-kompleksa-rossii-i-ego-problemy> (accessed 02 March 2017).
6. Dobryakov I.S. *The main directions and methods of organizational and economic changes in oil and gas industry*. *Vestnik MGTU*, 2010, vol. 13, no. 1, pp. 192–198. In Rus.
7. Gavrilyuk E.A. *Evaluation of the efficiency of oilfield development projects*. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2015, no. 8–1 (39), pp. 16–19. In Rus.

8. Zeynalov V.R., Sadig R.I. Metodicheskie polozheniya ekonomicheskoy otsenki effektivnosti investitsionnykh proektov po osvoeniyu neftegazovykh obektov [Methodical provisions of economic evaluation of the effectiveness of investment projects for the development of oil and gas facilities]. *Neftepromyslovoe delo*, 2012, no. 5, pp. 54–55. In Rus.
9. Aslanov N.M., Askerova F.A. Estimation of economic efficiency when investing in development of oil fields. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom*, 2013, no. 11, pp. 14–20. In Rus.
10. Gafarova S.G., Efendieva A.T. Azerbaijan oil strategy and methods for analyzing the effectiveness of investment projects. *European Social Science Journal*, 2014, no. 7–1 (46), pp. 475–481. In Rus.
11. Salcheva S.S., Pavlovskaya A.V. Methodology for assessing the economic efficiency of investments in oil processing, taking into account the Nelson profitability index and the multiplier mechanism in the conjugate sectors of the economy. *Ekonomika i predprinimatelstvo*, 2014, no. 4–2 (45–2), pp. 646–648. In Rus.
12. Denisov M.N., Pozdnyakov N.I. Internal rate of return and net present value as key indicators of economic evaluation of projects for development of mineral deposits. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2007, no. 4, pp. 58–60. In Rus.
13. Emigh J. Net present value. *Computerworld*, 1999, vol. 33, no. 30, pp. 52–56.
14. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke investitsionnykh proektov ot 21.06.1999 N BK 477 (2-aya red.)* [Guidelines for assessing the investment projects]. Minekonomika RF, Minfin RF, Gosstroy RF. 271 p.
15. Hayward C. Net present value. *Financial Management*, 2002, vol. 32, pp. 11–13.
16. Kogan A. The criticism of net present value and equivalent annual cost. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 15–22.
17. Lozhkin O.B. Sistemnaya oshibka kontseptsii net present value [System error of the net present value concept]. *Sistemny analiz v ekonomike-2014: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Systemic analysis in Economics – 2014: Proceedings of the III International scientific-practical conference]. Moscow, 2015, pp. 194–197.
18. Chen Ch., Li G., Reynolds A. Robust constrained optimization of short- and long-term net present value for closed-loop reservoir management. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 2012, vol. 17, no. 3, pp. 849–864.
19. Anthes G.H. Internal rate of return. *Computerworld*, 2003, vol. 37, no. 7, pp. 32–35.
20. Shevkunov N.O. Qualitative transformation of the internal rate of return method of the innovation-investment project. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 2016, vol. 8, no. 4 (35). Available at: URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/48EVN416.pdf> (accessed 02 March 2017). In Rus.
21. Ng E.-H., Beruvides M.G. Multiple internal rate of return revisited: frequency of occurrences. *Engineering Economist*, 2015, vol. 60, no. 1, pp. 75–87.
22. Vrijland M.S.A. The future net present value of investment alternatives. *AACE international transactions*, 2000, pp. RI81–RI85.
23. Makeev V.A., Shevkunov N.O. Analysis of the interpreted meaning and characteristics of the internal rate of return. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2015, no. 1 (74), pp. 57–61. In Rus.
24. Berkovitch E., Israel R. Why the NPV criterion does not maximize NPV? *Review of Financial Studies*, 2004, vol. 17, no. 1, pp. 239–246.
25. Duque D.F.M., Díaz H.H.T. Investment decision analysis using net present value at risk (NPV at risk). *Revista Facultad de Ingeniería*, 2009, no. 49, pp. 199–213.
26. Shevkunov N.O. Analiz kompensatsionnykh sostavlyayushchikh vnutrenney normy dokhodnosti investitsionnogo proekta [Analysis of compensatory components of the internal rate of return on an investment project]. *Transport-2016: Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport-2016: proceedings of the International scientific-practical conference]. Rostov-on-Don, 2016, pp. 308–311.
27. Tang S.L., Tang H.J. The variable financial indicator IRR and the constant economic indicator NPV. *Engineering Economist*, 2003, vol. 48, no. 1, pp. 69–73.
28. Shevkunov N.O. Diagnostics of domestic analogues of the internal rate of return and discount rate. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2014, no. 4, pp. 134–137. In Rus.
29. Johnson D. NPV analysis and applications for competitive intelligence. *Competitive Intelligence Magazine*, 2003, vol. 6, no. 3, pp. 45–51.

Received: 28 March 2017.

#### Information about the authors

**Nikolay O. Shevkunov**, Cand. Sc., associate professor, Rostov State Transport University.

**Anna V. Zhigunova**, Cand. Sc., associate professor, Rostov State Transport University.

**Anastasiya V. Shevkunova**, engineer, Rostov State Transport University.

УДК: 631.438.2; 544.034.24; 532.5-1/-9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ГРАФИТОВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

**Павлюк Александр Олегович<sup>1</sup>,**  
seversknet@rambler.ru

**Котляревский Сергей Геннадьевич<sup>1</sup>,**  
skotkyarevkiy@rambler.ru

**Беспала Евгений Владимирович<sup>1</sup>,**  
bespala\_evgeny@mail.ru

**Волкова Анна Генриховна<sup>2</sup>,**  
anna.agv@yandex.ru

**Захарова Елена Васильевна<sup>2</sup>,**  
zevchem@rambler.ru

**Андрющенко Наталья Дмитриевна<sup>2</sup>,**  
nataliarchem@gmail.com

<sup>1</sup> АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов», Россия, 636000, г. Северск, ул. Автодорога 13, 179а.

<sup>2</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, Россия, 119071, г. Москва, пр. Ленинский, 31, корп. 4.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью определения свойств инженерных глинистых барьеров безопасности, характеризующих надежность изоляции долгоживущих радионуклидов в пункте захоронения графитовых твердых радиоактивных отходов.

**Цель работы:** оценка влияния вариации параметров, характеризующих "барьерные" свойства материала, на динамику распространения долгоживущих радионуклидов  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  из пункта размещения графитовых радиоактивных отходов.

**Методы исследования:** математическое моделирование процесса миграции долгоживущих радионуклидов с учетом диффузионных и фильтрационных потоков путем решения квазиодномерного нестационарного уравнения диффузии в программном комплексе Mathlab.

**Результаты.** Разработана математическая модель миграции долгоживущих радионуклидов из облученного графита уран-графитовых реакторов, находящегося в хранилищах, в глинистые барьеры безопасности, учитывающая фильтрационное движение влаги и снижение активности радионуклидов за счет радиоактивного распада. Показано, что для выбранных радионуклидов диффузионные потоки в природных глинах незначительны и практически не влияют на процесс миграции. Наиболее значимым фактором является вынужденная конвекция при перемещении влаги. В результате происходит перенос радионуклидов через барьеры безопасности во вмещающие породы. Доказано, что используемые в настоящее время глиносодержащие барьеры безопасности надежно изолируют радионуклид  $^{14}\text{C}$  в пункте консервации или захоронения облученного ядерного графита даже в случае их обводнения. При этом превышение уровня вмешательства для  $^{36}\text{Cl}$  в таком барьере безопасности возможно только при условии отсутствия конвективных потоков влаги для рассмотренных консервативных условий моделирования. Показано, что для реального хранилища условие превышения уровня вмешательства для  $^{36}\text{Cl}$  определяется существенно меньшей активностью  $^{36}\text{Cl}$  по сравнению с  $^{14}\text{C}$  (более 3-х порядков), а также многократным разбавлением концентрации  $^{36}\text{Cl}$  по мере удаления от источника конечной геометрии.

### **Ключевые слова:**

Радионуклид, хранилище радиоактивных отходов, облученный графит, миграция, диффузия.

### **Введение**

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации № 1069 от 19.10.2012 «О критериях отнесения...» графит кладок активной зоны энергетических уран-графитовых реакторов (УГР) относится к классу 2 удаляемых твердых РАО (долгоживущие отходы средней категории активности с периодом полураспада отдельных радионуклидов более 31 года) и подлежит захоронению в пунктах глубинного захоронения РАО (ПЗРО). Также ко 2-му классу удаляемых

РАО относится большая часть аварийного графита, содержащего просыпи ОЯТ. Графитовые РАО класса 3 могут быть захоронены в приповерхностных ПЗРО.

Система захоронения РАО – это совокупность природно-геологических образований (вмещающие и покрывающие породы), конструктивных элементов пункта захоронения, материала захороняемых РАО (облученный графит – основной источник активности) и создаваемых инженерных барьеров безопасности. Данный подход позволяет

решить проблему радиоактивных отходов, в первую очередь графитовых.

Класс РАО основной массы облученного графита (более 90 %) определяется главным образом наличием в составе деталей графитовых кладок долгоживущих радионуклидов (прежде всего,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ) и их содержанием. Применительно к графиту энергетических УТР класс РАО определяет  $^{14}\text{C}$ , удельная активность которого лежит в диапазоне  $10^4$ – $10^6$  Бк/г. Другой долгоживущий изотоп –  $^{36}\text{Cl}$ , не является определяющим, поскольку его удельная активность составляет величину  $10^2$ – $10^3$  Бк/г (ниже границы САО-НАО).

Основной задачей обоснования выбора варианта захоронения основной массы графитовых РАО является удовлетворение требованиям гарантированной изоляции данных радионуклидов на весь период сохранения ими потенциальной опасности.

Надежная изоляция радионуклидов может быть достигнута при создании дополнительных барьеров безопасности, состоящих из природных глин. Противомиграционные и противодиффузионные свойства таких барьеров зависят от сорбционных, водно-физических и химических характеристик используемого материала. При этом в ряде случаев даже незначительные вариации параметров, характеризующих данные свойства, могут определять применимость материала для создания дополнительных барьеров безопасности.

Таким образом, целью настоящей работы является оценка влияния вариации параметров, характеризующих «барьерные» свойства материала, на динамику распространения долгоживущих радионуклидов  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  из пункта размещения графитовых радиоактивных отходов.

#### Разработка математической модели

Известно, что радионуклиды, попадающие во вмещающие породы из хранилища радиоактивных отходов, под действием внешних сил могут мигрировать в горизонтальном и вертикальном направлениях, что способствует их поступлению в грунтовые воды, в воды водоемов. К таким силам можно отнести: капиллярный поток влаги к поверхности в результате испарения жидкости, фильтрация атмосферных осадков и влаги техногенного происхождения в почве, массоперенос влаги под действием градиента температур, диффузия адсорбированных и свободных ионов, перенос на мигрирующих коллоидных частицах и др. [1]. Дополнительно к этому при расчете миграции радионуклидов необходимо учитывать процессы радиоактивного распада, энерговыделения в результате радиоактивного распада, конвективного и кондуктивного теплообмена [2]. Поэтому моделирование такой гетерогенной системы затруднено в силу наличия большого количества внешних факторов, влияющих на процесс массопереноса.

В рамках настоящего исследования рассматривается сценарий вероятного обводнения условного хранилища графитовых радиоактивных отходов

влажной техногенной или природной происхождения, которая движется в горизонтальном направлении с постоянной скоростью  $U_0$ , т. е. имеет место конвективный перенос (рис. 1) [3–6]. Предполагалось, что в результате внешнего воздействия на объект захоронения ТРО происходит выход наиболее мобильных долгоживущих радионуклидов из облученного графита. Графит при нормальных температурных условиях является практически «неокисляемым» материалом, поэтому выход радионуклидов из графитовых РАО будет определяться исключительно параметрами их селективного выщелачивания [7]. За счет диффузионного и конвективного перемещения влаги происходит миграция радионуклидов из облученного графита в искусственные глинистые барьеры безопасности, характеризующиеся высокими противодиффузионными и противомиграционными свойствами, шириной  $L_1$ . Со временем возможен выход радионуклидов в естественный грунт протяженностью  $L_2$ . При этом в расчетной модели предлагалось, что ширина глинистого барьера намного меньше ширины естественного грунта ( $L_1 \ll L_2$ ).

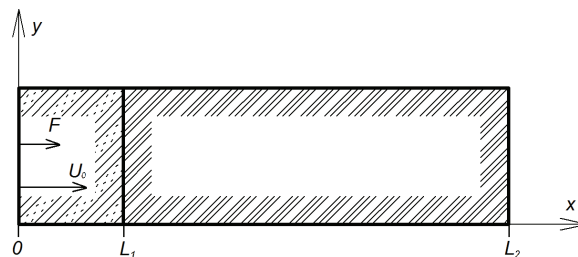


Рис. 1. Схема расчетной области

Fig. 1. Scheme of calculation area

Для моделирования процесса массопереноса в системе облученный графит – барьер – порода использовали второй закон Фика и решали квазистационарные нестационарные уравнения диффузии в декартовой системе координат (1), (2) с учетом фильтрационного движения влаги и снижения активности долгоживущих радионуклидов за счет радиоактивного распада [8]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{1i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - u_{1i} \frac{\partial C_i}{\partial x} - \lambda_i C_i, \quad 0 < x < L_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{2i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - u_{2i} \frac{\partial C_i}{\partial x} - \lambda_i C_i, \quad L_1 < x < L_2; \quad (2)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го долгоживущего радионуклида в геологической формации, Бк/м<sup>3</sup>;  $D_{1i}$  и  $D_{2i}$  – коэффициент диффузии  $i$ -го радионуклида в барьере безопасности и грунте соответственно, м<sup>2</sup>/с;  $u_{1i}$  и  $u_{2i}$  – скорость движения  $i$ -го радионуклида в барьере безопасности и грунте соответственно, м/с;  $\lambda_i$  – постоянная распада  $i$ -го радионуклида, которая однозначно связана с периодом полураспада, с<sup>-1</sup>;  $t$  – время, с.

Существуют различные способы определения скорости поступления  $i$ -го радионуклида в барьер безопасности. Например, в работе [9] на одной из



границ расчетной области задавались граничные условия I рода, что предполагало постоянство концентрации на ней. В другой работе [10] для этого вводилась специальная функция  $\varphi$ , которая учитывала время выщелачивания радионуклидов из графитовой кладки и их неравномерность распределения. Однако такой способ учета поступления радионуклидов в барьеры безопасности и выбранная постановка задачи приводят к неточностям в оценке скорости миграции и времени защитного действия барьеров, так как подразумевают наличие объемного источника внутри самого барьера. Для устранения этого недостатка целесообразно исходить из предположения, что на одной из границ расчетной области существует постоянный по времени массовый поток  $F$   $i$ -го радионуклида в барьер безопасности, который образуется при выщелачивании этого радионуклида с поверхности графитовых РАО под действием внешнего потока влаги  $U_0$ :

$$-D_{1i} \left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=0} = Ra_0 e^{-\lambda t} = F_0 e^{-\lambda t} = F, \quad (3)$$

где  $a_0$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида, Бк/г;  $R$  – скорость выщелачивания  $i$ -го радионуклида, г/(см<sup>2</sup>·сут) [11];  $F_0$  – интенсивность выхода  $i$ -го радионуклида с единицы поверхности РАО и переход его в мобильную форму, Бк/(см<sup>2</sup>·сут);  $F$  – интенсивность выхода  $i$ -го радионуклида с единицы поверхности РАО и переход его в мобильную форму с учетом радиоактивного распада, Бк/(см<sup>2</sup>·сут).

В месте контакта глинистого барьера безопасности и породы будет соблюдаться равенство диффузионных потоков:

$$D_{1i} \left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=L1} = D_{2i} \left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=L1}. \quad (4)$$

Условие на правой границе выбиралось из соображений гарантированного отсутствия  $i$ -го радионуклида в этом месте через время, сравнимое с периодом полураспада выбранного радионуклида:

$$C_i \Big|_{x=L2} = 0. \quad (5)$$

Средняя линейная скорость движения радионуклида под действием влаги в барьере безопасности и природном грунте  $u_{1i}$  и  $u_{2i}$  с учетом фильтрационного потока и пористости материала в общем случае определялось из уравнения [12–14]:

$$u = \frac{\theta u_0}{K_d \rho_\varepsilon}, \quad (6)$$

где  $\theta$  – средняя влажность геологического материала, %;  $K_d$  – коэффициент межфазного распределения  $i$ -го радионуклида, см<sup>3</sup>/кг;  $\rho_\varepsilon$  – плотность материала с учетом пористости.

Предполагалось, что в начальный момент времени активность и, соответственно, концентрация  $i$ -го радионуклида в барьерном материале и природном грунте равна нулю:

$$C_i \Big|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

Поставленная задача решалась с учетом допущений, что долгоживущие радионуклиды химически инертны к материалу геологических формаций, влага перемещается с постоянной скоростью вне зависимости от термодинамических условий. Решение уравнений (1), (2) с граничными (3)–(5) и начальными (7) условиями проводилось в математическом пакете MathLab [15–17]. При этом дифференциальные операторы заменялись на конечно-разностные аналоги. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решались локально-одномерным методом. Для решения одномерных разностных уравнений применялся метод прогонки с использованием неявной схемы. Нелинейные уравнения решались методом итераций.

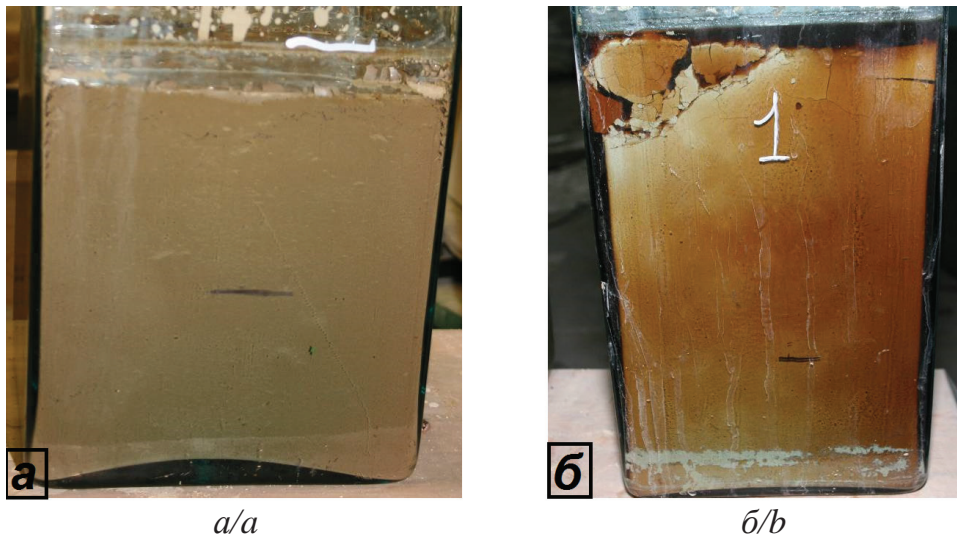
### Получение исходных данных

На территории площадок размещения реакторных установок с графитовым замедлителем пункты хранения твёрдых радиоактивных отходов, содержащих облученный графит, расположены в приповерхностном слое грунта. Вмещающие хранилища породы представлены песками и суглинками. Минералогический состав пород включает: кварц (60–80 %), 5 % полевые шпаты (5–15 %), глинистые минералы (10–20 %), остальное хлорит, слюды, обломочные материалы.

Пески в основном мелкие и средней крупности, отчасти пылеватые. По степени плотности слоения – рыхлые, средней плотности и плотные, причем плотность песков закономерно увеличивается с глубиной. В среднем плотность составляет до 1,75 г/см<sup>3</sup>, коэффициент пористости – 0,60. По степени увлажнения пески в верхней части разреза маловлажные и влажные, в нижней части разреза – влажные.

В настоящее время приреакторные хранилища, содержащие графитовые радиоактивные отходы и относящиеся к «ядерному наследию», не в полной мере удовлетворяют более жестким современным требованиям хранения радиоактивных материалов. Выполнение таких требований возможно только при условии создания в существующих приреакторных хранилищах дополнительных барьеров безопасности, образующих совместно с вмещающими хранилище породами (природный барьер) многобарьерную защитную систему. При этом конструктивные элементы хранилища (стены, пол и др.) в качестве барьеров безопасности не рассматриваются, так как время сохранения свойств конструктивных материалов пренебрежимо мало по сравнению периодом сохранения потенциальной опасности рассматриваемых радионуклидов.

Создаваемая барьерная система должна обеспечивать условия размещения ТРО, при которых перенос радионуклидов возможен только за счет процессов диффузии. При этом коэффициенты диффузии в материале барьера радионуклидов должны быть настолько низкими, чтобы уровень их активности при выходе за пределы хранилища не превышал уровни вмешательства.



**Рис. 2.** Макет, имитирующий глиняный барьер безопасности: а) сухой; б) обводненный  
**Fig. 2.** Model imitating the safety barrier: a) dry; b) watered

В качестве перспективного варианта решения проблемы в АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов» (АО «ОДЦ УГР») рассматривается вариант создания дополнительных барьеров безопасности путем заполнения свободного пространства хранилища глинистым раствором. Барьер сооружается внутри хранилища путем нагнетания глиняного раствора через перфорированные трубы, шаг размещения которых определяется с таким расчетом, чтобы нагнетаемая глинистая масса распределялась по всему объему хранилища. После высыхания глины в хранилище образуется глиняный монолит, содержащий твердые радиоактивные отходы и препятствующий миграции радионуклидов. Пример созданных барьеров безопасности на макете, имитирующем хранилище графитовых РАО, представлен на рис. 2, а. Случай альтернативного сценария, в котором происходит обводнение хранилища, заполненного радиоактивными отходами и барьерным материалом, представлен на рис. 2, б.

Наведенная активность облученного графита определяется в основном  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , при этом 95 % активности облученного графита составляет долгоживущий радионуклид  $^{14}\text{C}$ . Хотя активность  $^{36}\text{Cl}$  приблизительно в 1000 раз меньше, чем  $^{14}\text{C}$ , но за счет более высокого периода полураспада  $^{36}\text{Cl}$  относительно  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2}^{^{14}\text{C}}=5730$  лет, а  $T_{1/2}^{^{36}\text{Cl}}=3 \cdot 10^5$  лет), то проводить оценку миграции необходимо как для  $^{14}\text{C}$ , так и для  $^{36}\text{Cl}$ .

Экспериментально и также путем анализа имеющихся литературных данных были определены основные характеристики (сорбционные, водно-физические и химические) пород и используемых глинистых барьеров безопасности по отношению к выбранным долгоживущим радионуклидам. Сводная информация представлена в табл. 1 и 2.

**Таблица 1.** Параметры, необходимые для проведения расчетов (для  $^{14}\text{C}$ )

**Table 1.** Parameters required for calculations (for  $^{14}\text{C}$ )

Объект Object	Коэффициент диффузии, $D$ Diffusion coefficient, $D$	Коэффициент межфазного распределения, $K_d$ Interfacial distribution coefficient, $K_d$	Плотность, $\rho_s$ (г/см <sup>3</sup> ) Density, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Средняя влажность, $\theta$ (%) Average humidity, $\theta$
<b>Глина</b> Clay	$10^{-5}$ м <sup>2</sup> /год	(0–0,12) м <sup>3</sup> /кг [10]	(1–1,5) г/см <sup>3</sup>	(10–23)
<b>Грунт</b> Soil	$10^{-11}$ м <sup>2</sup> /с [18]	0	(1,75–1,8)	

**Таблица 2.** Параметры, необходимые для проведения расчетов (для  $^{36}\text{Cl}$ )

**Table 2.** Parameters required for calculations (for  $^{36}\text{Cl}$ )

Объект Object	Коэффициент диффузии, $D$ Diffusion coefficient, $D$	Коэффициент межфазного распределения, $K_d$ Interfacial distribution coefficient, $K_d$	Плотность, $\rho_s$ (г/см <sup>3</sup> ) Density, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Средняя влажность, $\theta$ (%) Average humidity, $\theta$
<b>Глина</b> Clay	(1,5–2,1)·10 <sup>-10</sup> м <sup>2</sup> /с [19] (3–6)·10 <sup>-6</sup> см <sup>2</sup> /с [20]	0 м <sup>3</sup> /кг [21]	(1–1,5)	(10–23)
<b>Грунт</b> Soil	$10^{-5}$ см <sup>2</sup> /сут [1]		(1,75–1,8)	

При решении уравнений (1), (2) с граничными (3)–(5) и начальным (7) условиями в качестве постоянных величин выбирались коэффициент диффузии  $D$ , коэффициент межфазного распределения  $K_d$ , постоянная распада долгоживущих радионуклидов  $\lambda$ . Расчет скорости миграции проводили при следующих значениях изменяемых параметров:

- интенсивность выхода  $^{14}\text{C}$  с единицы поверхности графита  $F_0$ , Бк/(см<sup>2</sup>·сут): 1; 0,1; 0,01;
- интенсивность выхода  $^{36}\text{Cl}$  с единицы поверхности графита  $F_0$ , Бк/(см<sup>2</sup>·сут):  $10^{-2}$ ;  $10^{-3}$ ;  $10^{-5}$ ;
- скорость движения влаги  $U_0$ , м/год: 0; 1; 5; 10;
- плотность глинистого барьера безопасности  $\rho_e$ , г/см<sup>3</sup>: 1; 1,4; 1,8;
- толщина глинистого барьера безопасности  $l$ : 1 м; 5 м; 10; м;
- влажность глинистого барьера безопасности  $\theta$ , %: 13; 23; 30.

По результатам расчета был накоплен массив данных, отражающий скорость миграции основных долгоживущих радионуклидов и время защитного действия барьеров.

### Обсуждение полученных результатов

По имеющимся данным (табл. 1 и 2) проведен расчет скорости миграции радионуклидов  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  из хранилища графитовых РАО под действием потока влаги при различных параметрах глинистого барьера безопасности и прилегающего грунта. На рис. 3 представлен профиль концентрации  $^{14}\text{C}$  по толщине барьера в течение 10000 лет после начала обводнения хранилища при условиях:  $U_0=1$  м/год,  $l=5$  м,  $\theta=23$  %,  $\rho_e=1,4$  г/см<sup>3</sup>,  $F_0=0,01$  Бк/(см<sup>2</sup>·сут),  $K_d=0,12$  м<sup>3</sup>/кг. Из графика 3 видно, что искусственно созданный глинистый барьер безопасности позволяет надежно изолировать графитовые РАО, поскольку за время 10000 лет радионуклид  $^{14}\text{C}$  проникает в глубь барьера не более чем на 2,5 см. При этом определяющим является процесс конвективного переноса  $^{14}\text{C}$ . Диффузионные потоки в данном случае слабо влияют на процесс миграции из-за относительно небольших значений коэффициентов диффузии ( $10^{-5}$  м<sup>2</sup>/год), что приводит к накоплению радионуклидов на границе облученный графит – глинистый барьер (до  $3 \cdot 10^{-8}$  Бк/м<sup>3</sup>). Поэтому скорость миграции  $^{14}\text{C}$  будет определяться коэффициентом межфазного распределения и скоростью фильтрации, которая для выбранной глины составляет ( $10^{-5}$ – $10^{-3}$ ) м/сут. Исходя из этого, при максимально возможной интенсивности выхода  $^{14}\text{C}$  из графита 1 Бк/(см<sup>2</sup>·сут), плотности глинистого материала 1 г/см<sup>3</sup> и скорости движения влаги до 10 м/год необходимо и достаточно создавать глинистый барьер безопасности толщиной до 1 м. Это исключит превышение уровня вмешательства в течение длительного времени.

Необходимо отметить, что коэффициент межфазного распределения  $^{14}\text{C}$  для различных глин варьируется в диапазоне  $K_d=0$ – $0,12$  м<sup>3</sup>/кг. Следует учесть, что в случае отсутствия сорбции ( $K_d=0$ ) скорость движения диффузионного профиля будет полностью определяться либо скоростью направленного потока влаги (в случае его наличия), либо коэффициентом диффузии  $^{14}\text{C}$  во влажной глине. Таким образом, на работоспособность барьера по отношению к  $^{14}\text{C}$  оказывают существенное влияние сорбционные характеристики материала.

Так, например, при расчете миграции радионуклидов из пункта консервации ПУГР ЭИ-2 [4] было принято консервативное допущение по отсутствию сорбции  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  в материале барьера и вмещающих породах. При этом учет гидрогеологических и ряда других условий в районе размещения объекта при моделировании всего процесса распространения данных радионуклидов привел к результату, свидетельствующему о многократном запасае до превышения уровней вмешательства в местах разгрузки водных горизонтов.

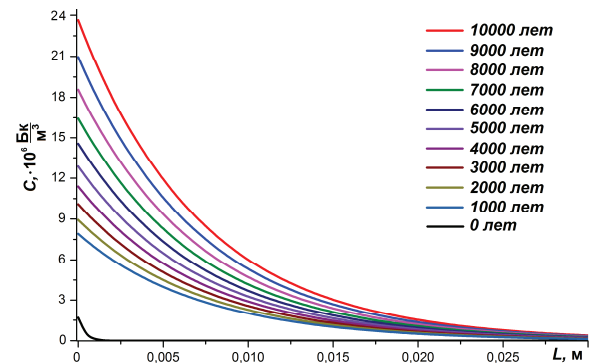


Рис. 3. Изменение профиля концентрации  $^{14}\text{C}$  по толщине барьера с течением времени при:  $U_0=1$  м/год,  $l=5$  м,  $\theta=23$  %,  $\rho_e=1,4$  г/см<sup>3</sup>,  $F_0=0,01$  Бк/(см<sup>2</sup>·сут),  $K_d=0,12$  м<sup>3</sup>/кг

Fig. 3. Changing the profile of  $^{14}\text{C}$  concentration in the barrier thickness over time with:  $U_0=1$  m/year,  $l=5$  m,  $\theta=23$  %,  $\rho_e=1,4$  g/cm<sup>3</sup>,  $F_0=0,01$  Bq/(cm<sup>2</sup>·day),  $K_d=0,12$  m<sup>3</sup>/kg

Аналогичные расчеты были проведены для другого долгоживущего радионуклида –  $^{36}\text{Cl}$ , который по своим физико-химическим и сорбционным свойствам отличается от  $^{14}\text{C}$ . Известно, что данный радионуклид фактически не сорбируется глинами (табл. 2), а скорость его миграции будет определяться скоростью движения влаги. Это подтверждается результатами расчетов (рис. 4).

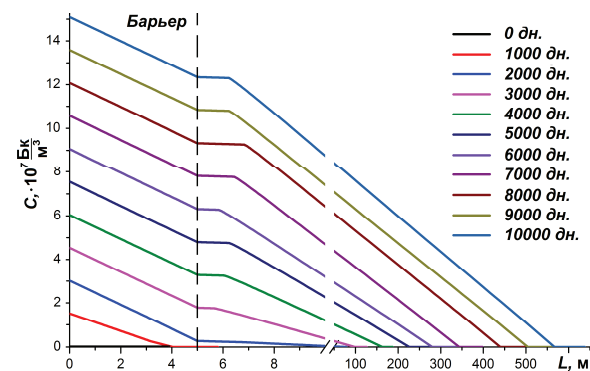


Рис. 4. Изменение профиля концентрации  $^{36}\text{Cl}$  по толщине барьера и прилегающего грунта с течением времени при:  $U_0=1$  м/год,  $l=5$  м,  $\theta=23$  %,  $\rho_e=1,4$  г/см<sup>3</sup>,  $F_0=0,01$  Бк/(см<sup>2</sup>·сут),  $K_d=0,12$  м<sup>3</sup>/кг

Fig. 4. Changing the profile of  $^{36}\text{Cl}$  concentration in the barrier and soil thickness over time with:  $U_0=1$  m/year,  $l=5$  m,  $\theta=23$  %,  $\rho_e=1,4$  g/cm<sup>3</sup>,  $F_0=0,01$  Bq/(cm<sup>2</sup>·day),  $K_d=0,12$  m<sup>3</sup>/kg



Из графиков видно, что искусственно созданный барьер безопасности снижает скорость миграции радионуклида  $^{36}\text{Cl}$ , однако полностью его не задерживает. Вероятно это связано с тем, что коэффициент диффузии в глине и прилегающем грунте различен ( $(1,5-2,1) \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$  для глины и  $10^{-5} \text{ см}^2/\text{сут}$  для грунта). При этом глинистый барьер безопасности толщиной не более 5 м и  $\theta=23\%$ ,  $\rho_s=1,4 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $F_0=0,01 \text{ Бк}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$  будет препятствовать распространению  $^{36}\text{Cl}$  в течение не более 1500 дней. С увеличением толщины барьера безопасности время защитного действия увеличивается, однако оно несопоставимо со временем защитного действия для  $^{14}\text{C}$ . Стоит отметить, что в отличие от  $^{14}\text{C}$  концентрация радионуклида  $^{36}\text{Cl}$  за время длительной консервации графитовых РАО (до 10000 лет) практически не снижается за счет естественного распада. Это накладывает дополнительные требования к материалу создаваемых барьеров.

Были получены значения скорости миграции радионуклидов  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  в зависимости от плотности барьеров безопасности и скорости движения влаги (рис. 5). Поскольку фильтрационный поток для  $^{36}\text{Cl}$  в глине и грунте отсутствует, то плотность геологических материалов почти не влияет на скорость миграции этого радионуклида и составляет порядка 60 мм/день. Фактически движение радиоактивного хлора происходит под действием диффузионного и конвективного потоков при их совместном действии без сопротивления. Совершенно другая зависимость наблюдается для  $^{14}\text{C}$ . Скорость миграции данного радионуклида существенно зависит от величины уплотнения глинистого барьера безопасности. При этом она линейно снижается при увеличении плотности барьерного материала и для выбранного расчетного диапазона может составлять (37–70) мм/год.

С увеличением скорости движения влаги через глинистый барьер безопасности и прилегающий грунт также возрастает скорость миграции радионуклидов (рис. 5, б). При этом данная зависимость носит почти линейный характер. Отклонение от

прямой линии в некоторых точках связано с увеличением доли диффузионного потока для выбранных радионуклидов. Однако определяющим является скорость фильтрации, поскольку скорость движения  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  внутри глины отличается на несколько порядков при условии, что водяной поток с углеродом подвержен фильтрации.

#### Заключение

Таким образом, безопасность пункта захоронения графитовых РАО определяется параметрами миграции долгоживущих радионуклидов  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$ , которые подвержены выщелачиванию в случае попадания воды в хранилище из-за возможного наличия трещин в барьере. Поэтому основными требованиями к материалу барьеров безопасности являются высокие противодиффузионные и противомиграционные характеристики. При этом такие барьеры должны обеспечивать надежную гидроизоляцию.

В работе было показано, что для выбранных радионуклидов диффузионные потоки в природных глинах незначительны и практически не влияют на процесс миграции. Наиболее значимым фактором является вынужденная конвекция под действием движущейся влаги. В результате происходит перенос радионуклидов через барьеры безопасности в грунт. Однако из-за наличия фильтрационных потоков для  $^{14}\text{C}$  скорость миграции не превышает (37–70) мм/год, что не позволяет ему за длительный период времени (порядка 10000 лет) диффундировать через глинистый барьер в грунт. В отличие от  $^{14}\text{C}$  радионуклид  $^{36}\text{Cl}$  практически не фильтруется и не задерживается в глинистом материале, что приводит к его выходу за пределы барьера уже через несколько десятков лет.

Таким образом, используемые в настоящее время глиносодержащие барьеры безопасности надежно изолируют радионуклид  $^{14}\text{C}$  в пункте консервации или захоронения облученного ядерного графита даже в случае их обводнения. При этом непревышение уровня вмешательства для  $^{36}\text{Cl}$  в таком барьере безопасности возможно только при

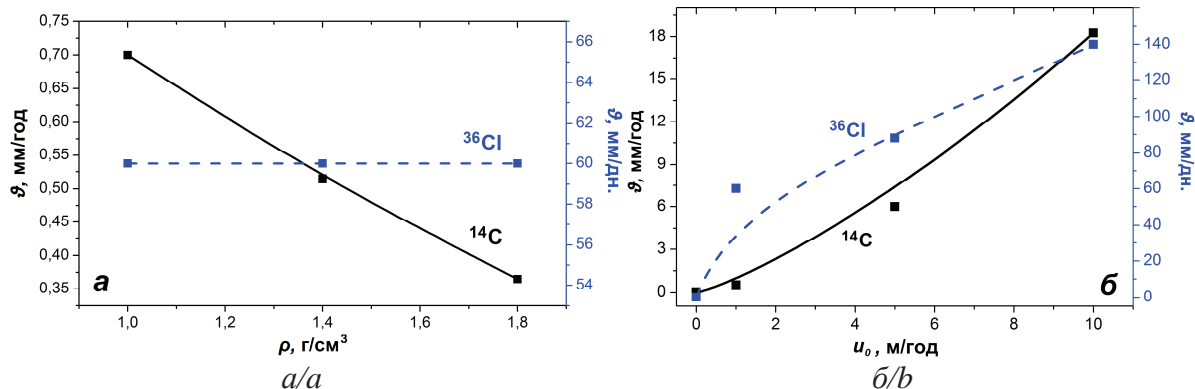


Рис. 5. Зависимость скорости миграции радионуклидов  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  от: а) плотности барьеров безопасности; б) скорости движения влаги

Fig. 5. Dependence of migration rate of radionuclides  $^{14}\text{C}$  and  $^{36}\text{Cl}$  on: a) density of safety barriers; b) rate of moisture movement



условии отсутствия конвективных потоков влаги для рассмотренных консервативных условий моделирования (поверхность источника – бесконечная плоскость). Для реального хранилища условие не превышения уровня вмешательства для  $^{36}\text{Cl}$

определяется существенно меньшей активностью  $^{36}\text{Cl}$  по сравнению с  $^{14}\text{C}$  (более 3-х порядков), а также многократным разбавлением концентрации  $^{36}\text{Cl}$  по мере удаления от источника конечной геометрии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические механизмы и моделирование / под ред. Р.М. Алексахина. – М.: Энергоиздат, 1981. – 98 с.
2. Истомин А.Д., Кораблев С.А., Носков М.Д. Математическое моделирование миграции радионуклидов в поверхностном слое грунта // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 3. – С.74–78.
3. Антоненко М.В., Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Моделирование процесса диффузии радиоуглерода из активной зоны выводимого из эксплуатации ПУГР АД // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – С. 63–68.
4. Izmetiev A., Pavliuk A., Kotlyarevsky S. Application of void-free filling technology for additional safety barriers creation during uranium-graphite reactors decommissioning // Advanced Materials Research. – 2015. – V. 1084. – P. 613–619.
5. Базылев В.В. Параметры миграции радионуклидов из грунтовых могильников твердых радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. – 1997. – № 1. – С. 31–35.
6. Ferroni L., Miracapillo C. Radionuclides migration in the far field of geological repositories: a numerical example // Energy Procedia. – 2014. – № 45. – P. 691–700.
7. Experimental simulation of the radionuclide behaviour in the process of creating additional safety barriers in solid radioactive waste repositories containing irradiated graphite / A.O. Pavliuk, S.G. Kotlyarevskiy, E.V. Bospala, E.V. Zaharova, N.I. Rodygina, V.M. Ermolaev, I.M. Proshin, A.G. Volkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – № 142. – P. 1–7.
8. Shackelford C.D., Moore S.M. Fickian diffusion of radionuclides for engineered containment barriers: Diffusion coefficients, porosities, and complicating issues // Engineering Geology. – 2013. – V. 152. – P. 133–147.
9. Abdel Rahman R.O., Zaki A.A., El-Kamash A.M. Modeling the long-term leaching behavior of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , and  $^{152,154}\text{Eu}$  radionuclides from cement-clay matrices // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – V. 145. – P. 372–380.
10. Чубреев Д.О., Кузнецов Г.В. Использование глинистых материалов для создания барьера безопасности выводимого из эксплуатации реактора АД // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 83–87.
11. Экспериментальное моделирование поведения радионуклидов при создании дополнительных барьеров безопасности в хранилищах твердых радиоактивных отходов, содержащих облученный графит / А.О. Павлюк, А.М. Измestьев, С.Г. Котляревский, Е.В. Беспала // Вопросы радиационной безопасности. – 2016. – № 1. – С. 64–69.
12. Кудряшов Н.А., Серебрякова И.Е. Математическое моделирование миграции долгоживущих радионуклидов в почве в результате радиоактивных выпадений // Атомная энергия. – 1993. – Т. 74. – С. 243–247.
13. Modeling of irradiated graphite  $^{14}\text{C}$  transfer through engineered barriers of a generic geological repository in crystalline rocks / P. Poskas, D. Grigaliuniene, A. Narkuniene, R. Kilda, D. Justinavicius // Science of the Total Environment. – 2016. – V. 569–570. – P. 1126–1135.
14. Van Loon L.R., Mibus J. A modified version of Archie's law to estimate effective diffusion coefficients of radionuclides in argillaceous rocks and its application in safety analysis studies // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 59. – P. 85–94.
15. Pacciarini P., Rozza G. Stabilized reduced basis method for parametrized advection-diffusion PDEs // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2014. – V. 274. – P. 1–18.
16. Varatharajan N., DasGupta A. The effect of perturbed advection on a class of solutions of solution of a non-linear reaction-diffusion equation // Applied Mathematics and Computation. – 2016. – V. 290. – P. 33–35.
17. Benedetti I., Taddei V., Vath M. Evolution problems with nonlinear nonlocal boundary conditions // J. Dynam. Differential Equation. – 2013. – V. 25. – № 2. – P. 477–503.
18. Modeling the migration of fallout radionuclides to quantify the contemporary transfer of fine particles in Luvisol profiles under different land uses and farming practices / M. Jagercikova, O. Evrard, J. Balesdent, I. Lefevre, S. Cornu // Soil & Tillage Research. – 2014. – V. 140. – P. 82–97.
19. Hendry M.J., Wassenaar L.I., Kotzer T. Chloride and chlorine isotopes ( $^{36}\text{Cl}$  and  $^{37}\text{Cl}$ ) as tracers of solute migration in a thick, clay-rich aquitard system // Water resource research. – 2000. – V. 36. – № 1. – P. 285–296.
20. Crooks V.E., Quigley R.M. Saline leachate migration through clay: a comparative laboratory and field investigation // Can. Geotech. J. – 1984. – V. 21. – P. 349–362.
21. Conceptual and numerical models of solute diffusion around a HLW repository in clay / J. Samper, A. Naves, C. Lu, Y. Li, B. Fritz, A. Clement // Physical and Chemistry of the Earth. – 2011. – V. 36. – P.1714–1720.

Поступила 29.03.2017 г.

#### Информация об авторах

**Павлюк А.О.**, кандидат физико-математических наук, руководитель группы Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов».

**Котляревский С.Г.**, ведущий инженер группы Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов».

**Беспала Е.В.**, кандидат физико-математических наук, инженер-физик группы Научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов».

**Волкова А.Г.**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории экологических проблем обращения с радиоактивными и токсичными отходами Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук.

**Захарова Е.В.**, кандидат химических наук, заведующая лабораторией экологических проблем обращения с радиоактивными и токсичными отходами Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук.

**Андрющенко Н.Д.**, научный сотрудник лаборатории экологических проблем обращения с радиоактивными и токсичными отходами Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук.

UDC: 631.438.2; 544.034.24; 532.5-1/-9

## MODELLING MIGRATION PROCESS OF LONG-LIVED RADIONUCLIDES FROM GRAPHITE RADIOACTIVE WASTE

**Alexander O. Pavlyuk<sup>1</sup>,**  
seversknet@rambler.ru

**Sergey G. Kotlyarevskiy<sup>1</sup>,**  
skotkyarevkiy@rambler.ru

**Evgeniy V. Bospala<sup>1</sup>,**  
bospala\_evgeny@mail.ru

**Anna G. Volkova<sup>2</sup>,**  
E-mail: anna.agv@yandex.ru

**Elena V. Zakharova<sup>2</sup>,**  
zevchem@rambler.ru

**Nataliya D. Andryushchenko<sup>2</sup>,**  
nataliarchem@gmail.com

<sup>1</sup> Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning, 179a, Avtodoroga 13 street, Seversk, 63600, Russia.

<sup>2</sup> A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS, 31, Leninsky avenue, Moscow, 119071, Russia.

**The relevance** of the discussed issue is caused by the need to identify the properties of engineering clay safety barriers that characterize the reliability of isolation of long-lived radionuclides at the place of disposal of graphite solid radioactive waste.

**The main aim** of the study is to assess the effect of parameters variation, which characterize protective properties of material, on the dynamics of propagation of long-lived radionuclides <sup>14</sup>C and <sup>36</sup>Cl from the repository of graphite radioactive waste.

**The methods used in the study:** mathematical modeling of the migration process of long-lived radionuclides taking into account diffusion and filtration flows by solving the quasi-one-dimensional nonstationary diffusion equation in the Matlab software complex.

**The results.** The authors have developed the mathematical model of migration of long-lived radionuclides from irradiated graphite of uranium-graphite reactors in storage to clay safety barriers that takes into account the filtration movement of moisture and reduction of radionuclide activity due to radioactive decay. It was shown that the diffusion fluxes of radionuclides in natural clays are insignificant and have practically no effect on migration. The most significant factor is the forced convection when moving moisture. As a result, radionuclides are transported through safety barriers to host rocks. It was proved that the clay-containing safety barriers currently used reliably isolate the radionuclide <sup>14</sup>C at the point of conservation or disposal of irradiated nuclear graphite even in the event of their watering. At the same time, the non-intervention level for <sup>36</sup>Cl in such a safety barrier is possible only if there are no convective moisture flows for the considered conservative modeling conditions. For a real repository, the condition of non-intervention of the level of interference for <sup>36</sup>Cl is determined by significantly lower activity of <sup>36</sup>Cl compared to <sup>14</sup>C, and also by multiple dilution of the <sup>36</sup>Cl concentration as far as the distance from the source of the final geometry was shown in the article.

### Key words:

Radionuclide, radioactive waste storage, irradiated graphite, migration, diffusion.

### REFERENCES

1. Prokhorov V.M. *Migratsia radioaktivnykh zagryazneniy v pochvakh* [Migration of radioactive pollutants in soil]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 98 p.
2. Istomin A.D., Korablev S.A., Noskov M.D. Mathematical simulation of radionuclides migration in surface layer of soil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 74–78. In Rus.
3. Antonenko M.V., Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. Simulation of diffusion of radiocarbon from reactor core of decommissioning PUGR AD. *Atomnaya energiya*, 2015, vol. 118, pp. C.63–68. In Rus.
4. Izmestiev A., Pavliuk A., Kotlyarevsky S. Application of void-free filling technology for additional safety barriers creation during uranium-graphite reactors decommissioning. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1084, pp. 613–619.
5. Bazylev V.V. Migration parameters of radionuclides from burial of solid radioactive waste. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, 1997, no. 1, pp. 31–35. In Rus.
6. Ferroni L., Miracapillo C. Radionuclides migration in the far field of geological repositories a numerical example. *Energy Procedia*, 2014, no. 45, pp. 691–700.
7. Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bospala E.V., Zakarova E.V., Rodygina N.I., Ermolaev V.M., Proshin I.M., Volkova A.G. Experimental simulation of the radionuclide behaviour in the process of creating additional safety barriers in solid radioactive waste repositories containing irradiated graphite. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, no. 142, pp. 1–7.
8. Shackelford C.D., Moore S.M. Fickian diffusion of radionuclides for engineered containment barriers: Diffusion coefficients, porosities, and complicating issues. *Engineering Geology*, 2013, vol. 152, pp. 133–147.

9. Abdel Rahman R.O., Zaki A.A., El-Kamash A.M. Modeling the long-term leaching behavior of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , and  $^{152,154}\text{Eu}$  radionuclides from cement-clay matrices. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 145, pp. 372–380.
10. Chubreev D.O., Kuznetsov G.V. Using clay materials for developing safety barrier of decommissioning AD reactor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. C. 83–87. In Rus.
11. Pavliuk A.O., Izmetiev A.M., Kotlyarevskiy S.G., Bospala E.V. Experimental simulation of radionuclide behavior in forming additional safety barriers in solid radioactive waste repositories containing irradiated graphite. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, 2016, no. 1, pp. 64–69. In Rus.
12. Kudryashov N.A., Serebryakova I.E. Mathematical simulation of migration of long-lived radionuclides in soil due to radioactive falling. *Atomnaya energiya*, 1993, vol. 74, pp. 243–247. In Rus.
13. Poskas P., Grigaliuniene D., Narkuniene A., Kilda R., Justinavicius D. Modeling of irradiated graphite  $^{14}\text{C}$  transfer through engineered barriers of a generic geological repository in crystalline rocks. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 569–570, pp. 1126–1135.
14. Van Loon L.R., Mibus J. A modified version of Archier's law to estimate effective diffusion coefficients of radionuclides in argillaceous rocks and its application in safety analysis studies. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 59, pp. 85–94.
15. Pacciarini P., Rozza G. Stabilized reduced basis method for parameterized advection-diffusion PDEs. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 2014, vol. 274, pp. 1–18.
16. Varatharajan N., DasGupta A. The effect of perturbed advection on a class of solutions of solution of a non-linear reaction-diffusion equation. *Applied Mathematics and Computation*, 2016, vol. 290, pp. 33–35.
17. Benedetti I., Taddei V., Vath M. Evolution problems with nonlinear nonlocal boundary conditions. *J. Dynam. Differential Equation*, 2013, vol. 25, no. 2, pp. 477–503.
18. Jagercikova M., Evrard O., Balesdent J., Lefevre I., Cornu S. Modeling the migration of fallout radionuclides to quantify the contemporary transfer of fine particles in Luvisol profiles under different land uses and farming practices. *Soil & Tillage Research*, 2014, vol. 140, pp. 82–97.
19. Hendry M.J., Wassenaar L.I., Kotzer T. Chloride and chlorine isotopes ( $^{36}\text{Cl}$  and  $^{37}\text{Cl}$ ) as tracers of solute migration in a thick, clay-rich aquitard system. *Water resource research*, 2000, vol. 36, no. 1, pp. 285–296.
20. Crooks V.E., Quigley R.M. Saline leachate migration through clay: a comparative laboratory and field investigation. *Can. Geotech. J.*, 1984, vol. 21, pp. 349–362.
21. Samper J., Naves A., Lu C., Li Y., Fritz B., Clement A. Conceptual and numerical models of solute diffusion around a HLW repository in clay. *Physical and Chemistry of the Earth*, 2011, vol. 36, pp. 1714–1720.

Received: 29 March 2017.

#### Information about the authors

**Alexander O. Pavlyuk**, Cand. Sc., head of the group, Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning.

**Sergey G. Kotlyarevskiy**, chief engineer, Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning.

**Evgeniy V. Bospala**, Cand. Sc., physics engineer, Pilot and Demonstration Center for Uranium-Graphite Nuclear Reactor Decommissioning.

**Anna G. Volkova**, Cand. Sc., researcher, Laboratory researcher, A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS.

**Elena V. Zakharova**, Cand. Sc., head of laboratory, A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS.

**Nataliya D. Andryushchenko**, laboratory researcher, A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS.



УДК 556.3; 551.4

## АНАЛИЗ ПОДТОПЛЯЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ НА ПРИМЕРЕ ГРУНТОВЫХ ВОД ГОРОДА НАЗЫВАЕВСКА

Медведков Кирилл Станиславович<sup>1,2</sup>,  
kmedvedkov@mail.ru

Штриплинг Лев Оттович<sup>1</sup>,  
los@omgtu.ru

<sup>1</sup> Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

<sup>2</sup> АО «Омская геологоразведочная экспедиция»,  
Россия, 644007, г. Омск, ул. Гусарова, д. 16.

Актуальность работы обусловлена возрастающим негативным влиянием подтопления территорий, увеличением ущерба и снижением качества жизни населения, проживающего на паводкоопасной местности. Непосредственно в Называевском районе подвержено подтоплению более 40 % площади, а в самом городе от подтоплений страдает более половины населения, все это способствовало выбору грунтовых вод Называевска в качестве объекта исследований.

**Цель работы:** выявление причин возникновения подтоплений, поиск решений по стабилизации ситуации с высоким уровнем грунтовых вод, прогнозирование изменений с учетом инфильтрационного питания.

**Методы исследования:** анализ многолетних наблюдений за грунтовыми водами на скважинах режимной сети мониторинга состояния недр, выявление графоаналитических зависимостей и расчет инфильтрационного питания на основании собранных данных.

**Результаты:** проанализирована ситуация с грунтовыми водами территорий с приречным (город Тюкалинск) и междуречным (город Называевск) режимом. Город Тюкалинск обладает большими возможностями в естественном регулировании приходно-расходного баланса грунтовых вод и способен нивелировать антропогенное воздействие за счет реки Тюкалка, которая обеспечивает естественный дренаж. Территория Называевска характеризуется слабой дренированностью, так как не имеет рек, и обладает равнинным рельефом, в виду чего изменения в приходном балансе грунтовых вод оказывает существенное влияние на ситуацию с подтоплениями. В процессе исследования выявлен большой антропогенный вклад в баланс грунтовых вод города Называевска, приведший с 1980 г. по настоящее время к серьезным проблемам с подтоплениями в населенном пункте. По предварительным расчетам этот вклад составляет порядка 19,3 %.

### Ключевые слова:

Подземные воды, величина инфильтрационного питания, разгрузка, подтопление, антропогенная деятельность, слабая дренированность, режим, скважина, наблюдения, уровень грунтовых вод.

Проблема подтопления территорий является глобальной для многих стран нашей планеты. В России от паводка страдают тысячи человек, гибнут посевы, разрушаются строения. В последнее десятилетие на освоенных территориях подвержено подтоплению около 9 млн га земель различного хозяйственного назначения, в том числе 5 млн га сельскохозяйственных земель и 0,8 млн га застроенных территорий населенных пунктов. Около 75 % городов и более 20 % поселков России подвержены данному негативному воздействию [1].

В Омской области, как и в России в целом, от паводка страдают тысячи человек. Ежегодно данным природным явлением наносится многомиллионный ущерб.

Одним из таких населенных пунктов, где негативное воздействие подтоплений сказывается на жизни всего населения, является город Называевск.

Называевск расположен на западе Омской области в пределах Ишимской равнины, являющейся частью Западно-Сибирской равнины. К югу от города расположены болота Давыдовское и Рыбалово, к западу – небольшое озеро без названия, к северу – болото Платоновское [2]. 45,4 % территории Называевского района подвержено затопле-

нию и подтоплению, что во многом связано со слабой дренированностью территории [3] и антропогенной деятельностью человека.

Подтопление оказывает негативное воздействие на проживание населения района и экосистему в целом. Так, площадь вымокающих лесов в Называевском районе достигла 25 тыс. га, при этом в некоторых березово-осиновых колках произошла полная деградация деревьев [4].

Проанализировать сложившуюся ситуацию можно на основании данных по существующей режимной сети наблюдательных скважин, которая в том числе есть и на территории города Называевска (рис. 1).

Одна из скважин сети (скв. № 122) оборудована на грунтовые воды (0–7 м), и регулярные наблюдения по ней ведутся с 1978 г. На протяжении всего времени данные по режиму собираются специалистами ТЦ ГМСН АО «ОГРЭ», а с июня 2014 г. измерения уровня подземных вод данной скважины проводятся с помощью стационарного автоматического уровнемера, результаты работы которого напрямую пополняют базу данных по государственной опорной наблюдательной сети скважин. Для более детального анализа колебания грунтовых вод был рас-



деву;  $\Delta h = 1,13 - 0,13 = 1,0$  м – наблюдаемое повышение уровня грунтовых вод за время  $\Delta t = 22$  сут;  $\Delta z = 1,21 - 1,13 = 0,08$  – величина, на которую бы снизился уровень грунтовых вод за время  $\Delta t = 22$  сут, за счет оттока по водоносному пласту.

В данном расчете рассмотрен период с 17.03 по 08.04, что позволяет определить усредненные данные за время обильного таяния снега. Очевидно, что, если бы мы взяли более короткий промежуток времени с интенсивным насыщением водой грунтов, показатели бы были значительно выше (практически вертикальный участок графика – с 01.04 по 03.04 – оттаивший верхний слой земли свободно начал пропускать снеговую воду).

Кроме того, данный график позволяет рассчитать среднегодовую величину инфильтрации годового изменения уровней грунтовых вод с допущением постоянного горизонтального стока (для водораздельного режима)  $\Delta z$  [5], взятого за последний промежуток зимнего снижения уровня ( $0,08/22 = 0,0036$ ). Пренебрегая испарением, расчет проведем по следующей формуле:

$$w_{cp} = \mu \left( \frac{\sum \Delta h_i}{365} + 0,0036 \right).$$

Для расчета  $\Delta h_i$  возьмем участки графика повышения уровня воды в скважине. Подставив данные ( $\Delta h_i$ , снятые с графика), получим:

$$w_{cp} = 0,1 \left( \frac{(0,28 + 0,14 + 0,11 + 0,18 + 0,33 + 0,16 + 0,13 + 0,39)}{365} + 0,0036 \right) = 0,00083 \text{ м / сут.}$$

Как видно из полученных расчетов, величина инфильтрационного питания в весенний период

превышает среднегодовую более чем в 6 раз, что приводит к серьезным последствиям, приводящим к обширным подтоплениям территории города Называевска.

Для рассмотрения глобальных изменений в уровнях грунтовых вод на протяжении десятилетий и определения тенденции (тренда) был выбран месяц февраль (рис. 3), так как в это время уровень грунтовых вод наиболее стабилен, что показал предыдущий график (рис. 2).

Приведенный график показывает определенную цикличность в пиках максимальных и минимальных уровней, но кроме них выделяются дополнительно три периода (тренда) изменений уровня грунтовых вод. Первый – когда среднегодовые колебания находятся на одном уровне, и линия тренда имеет горизонтальное направление – продолжающийся до начала 90-х и характеризующий «естественный баланс» грунтовых вод. Второй – когда уровень периодически переходит планку в 1,5 м, и который можно характеризовать как период увеличения объемов грунтовых вод, продолжающейся до 2007 г. И третий период – с 2007 г. по настоящее время, когда даже в феврале периодически уровень находится выше одного метра от поверхности земли, что можно связать со значительными проблемами в разгрузке грунтовых вод и с существенным увеличением их объема с 1978 г.

Для рассмотрения самого опасного в плане подтоплений периода был выбран апрель, когда наблюдаются максимальные подтопления в городе Называевске – талые воды увеличивают уровни грунтовых вод до максимальных отметок (рис. 4).

При анализе графика по уровням за апрель выделяется схожесть периодов со «спокойным», в плане уровней подземных вод, февралем. Первый период – с характерными циклическими колебаниями уровня, не переходящими планку в 1,5 м, – продолжает-

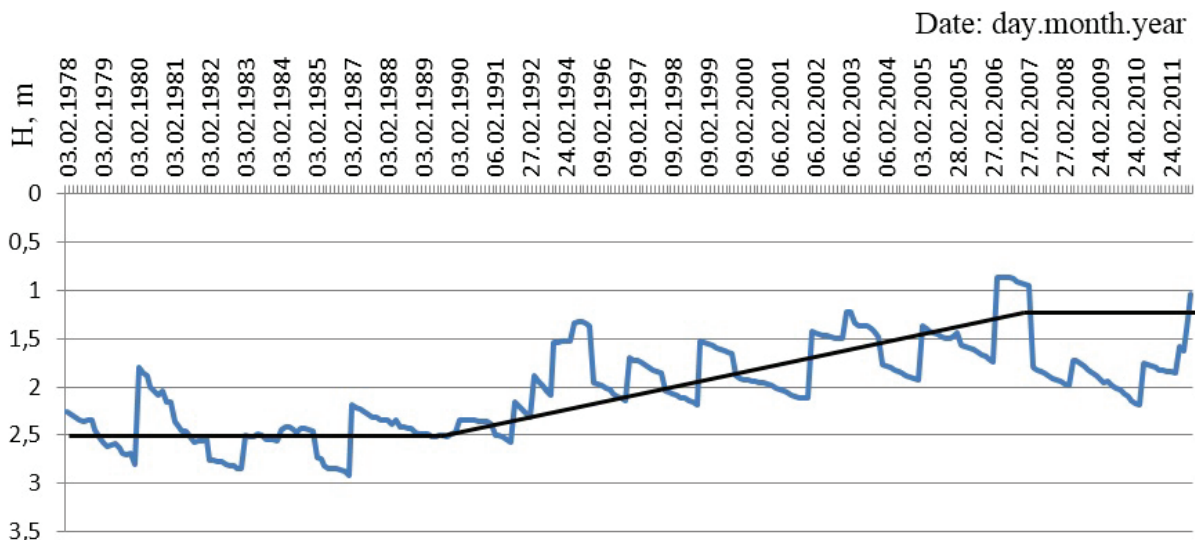
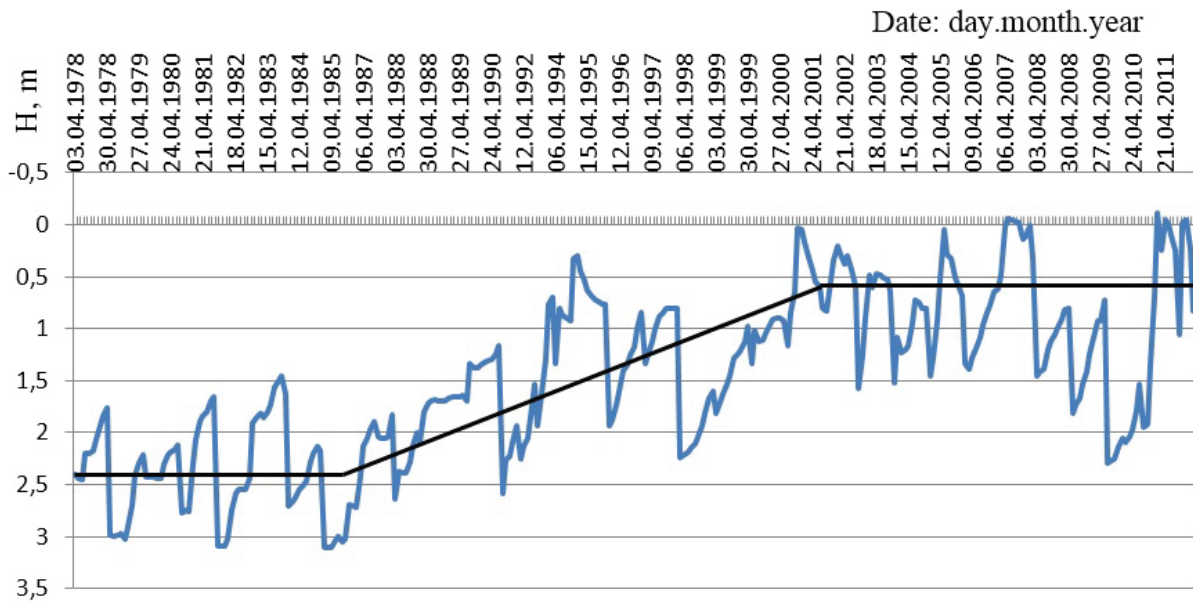


Рис. 3. График изменения уровня грунтовых вод в скважине № 122 в течение 33 лет (февраль)

Fig. 3. Schedule of changes in groundwater level in the well no. 122 for 33 years (February)





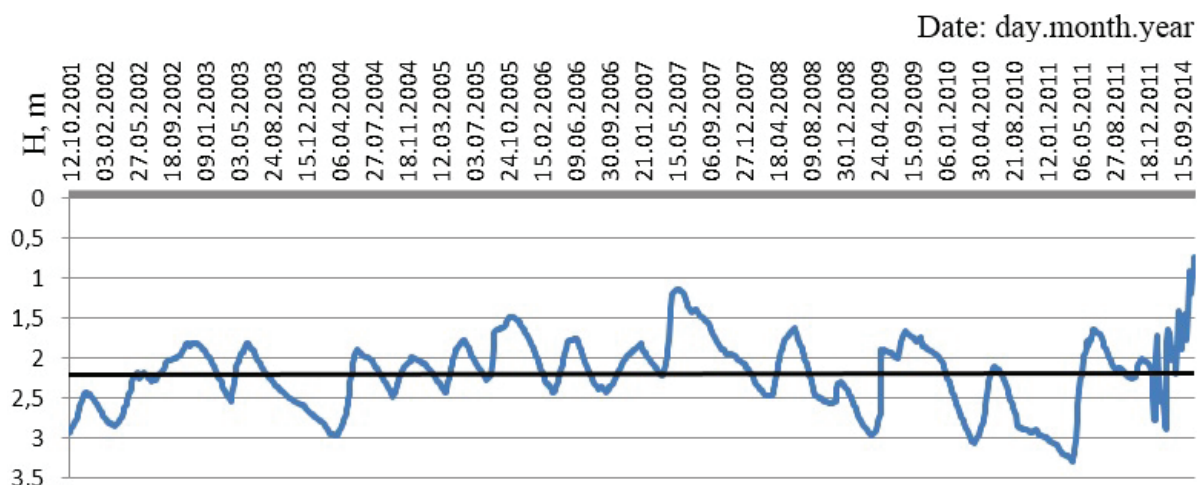
**Рис. 4.** График изменения уровня грунтовых вод в скважине № 122 в течение 33 лет (апрель)

**Fig. 4.** Schedule of changes in groundwater level in the well no. 122 for 33 years (April)

ся до 1986 г. Второй характеризуется резкими периодическими подъемами воды, порой переходящими уровень в 0,5 м от поверхности земли – длящийся до 2001 г. И последний, с 2001 г. по настоящее время, когда вода насыщает весь современный горизонт четвертичной системы и порой переходит планку ноль метров, затапливая не только подвалы и фундаменты домов, но и поверхность земли.

Для сопоставления полученных данных в разных условиях формирования подземных вод были проанализированы материалы по скважине № 275, расположенной в г. Тюкалинск, где режим подземных вод относится к приречному (прибрежному) виду, в отличие от междуречного (водораздельного) в г. Называевск. Город Тюкалинск расположен по обоим берегам реки Тюкалка, которая обеспечивает естественный дренаж грунтовых вод.

Город Тюкалинск расположен по обоим берегам реки Тюкалка, которая обеспечивает естественный дренаж грунтовых вод. Подземные воды данной местности относятся к приречному (прибрежному) режиму. Город Тюкалинск находится в 62 км с-в-в города Называевск, имеет равнинный рельеф, с абсолютными отметками над уровнем моря около 115 м, что по сравнению с Называевском меньше в среднем на 10 м. В Тюкалинске также присутствует режимная сеть наблюдательных скважин, данные по которым фиксируются ТЦ ГМСН (АО «ОГРЭ»). Одна из скважин, № 275, оборудована фильтром в интервале 7,8–15,7 м и располагается в 1,5 км восточнее главной реки города, наблюдения по ней ведутся с октября 2001 г. Анализ данных за весь период наблюдений приведен на графике, представленном на рис. 5.



**Рис. 5.** График изменения уровня подземных вод в скважине № 275 за весь период наблюдений

**Fig. 5.** Schedule of changes in groundwater level in the well no. 275 for the entire period of observation



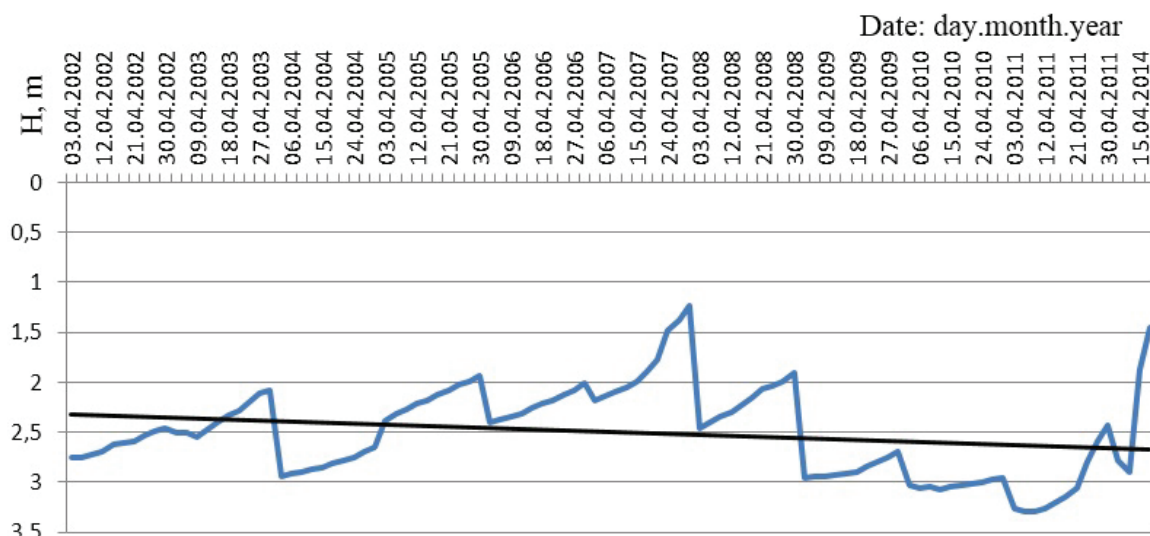


Рис. 6. График изменения уровня подземных вод в скважине № 275 в течение 14 лет (апрель)

Fig. 6. Schedule of changes in groundwater level in the well no. 275 for 14 years (April)

Полученные данные показывают циклические изменения уровня воды с повторением пиков и спадов уровней и с сохранением за весь период наблюдения нейтрального (горизонтального) тренда, позволяющего охарактеризовать ситуацию с грунтовыми водами как стабильную. Дополнительно к этому, с учетом полученных пиков и данных по осадкам, можно предсказывать наиболее острые изменения в плане паводка и заранее готовиться к возможным подтоплениям в низких участках рельефа. Циклическая и определенная предсказуемость поведения грунтовых вод была отражена в статьях многих авторов, например [6–11].

Рассматривая период весеннего снеготаяния, с динамикой изменения уровней за апрель, мы также получаем картину близкую к стабильной, за выбранный период наблюдений линия тренда уходит вниз (рис. 6).

С учетом более длительных исследований высокая вероятность того, что линия тренда, как и на рис. 5, видоизменится и будет горизонтальной. Стабильная ситуация в Тюкалинске во многом связана со сбалансированным поступлением и отводом на территорию атмосферных осадков и других источников воды. Большое влияние на водоотведение города оказывает река Тюкалка, в которую происходит разгрузка грунтовых вод, сглаживая приходно-расходную часть водного баланса.

Рассматривая полученные данные по городу Называевск, в сравнении с «соседним» Тюкалинском, можно отметить, что острая ситуация с подтоплениями в основном связана с антропогенной деятельностью человека, не учитывающей изначально естественно-природные факторы, обуславливающие слабую дренированность территории, что отмечено также другими авторами, например [12]. Так, на застраиваемых территориях происходит уплотнение грунтов зоны аэрации, что снижает пористость и значительно уменьшает степень водопроницаемо-

сти пород (величины коэффициентов фильтрации снижаются) [12, 13], при этом еще больше затрудняется путь миграции атмосферных осадков, что приводит к медленному уходу поверхностных вод (слабой разгрузке грунтовых) в годовом цикле, а порой и к накоплению их в многолетнем. Основной «вклад» в ухудшение ситуации с подтоплением города Называевска был сделан еще в 1980 г., когда был построен Любино-Исилькульский групповой водопровод, обеспечивающий централизованное водоснабжение города, и в настоящее время поставляющий около 2 тыс. м<sup>3</sup> воды ежедневно, которая остается на территории населенного пункта в виду отсутствия городских канализационных сооружений (водоотведения) [14]. Анализ изменений в подземных водах, происходящих от деятельности человека, отражен во многих литературных источниках, в том числе зарубежных [15–18].

Рассматривая антропогенное воздействие на водный баланс, а именно обеспечение водой города Называевска в объеме 2000 м<sup>3</sup>/сутки, можно приблизительно рассчитать влияние группового водопровода на грунтовые воды. Площадь города Называевск составляет порядка 12 км<sup>2</sup>. Приняв параметры «водоотведения» равными водопотреблению получим 730000 м<sup>3</sup>/год, то есть на каждый квадратный метр площади приходится дополнительно 0,06 м к годовому уровню осадков (в год на территории Называевского района выпадает порядка 400 мм атмосферных осадков [19]).

Если сравнить полученные показатели от воздействия водоснабжения города Называевск со среднегодовой величиной инфильтрации, которая была рассчитана выше, то можно определить, что вклад группового водопровода в водный баланс со-

ставляет порядка 19,3 % ( $\frac{0,06}{365} = 0,00016$  м/сут;  $\frac{0,00016}{0,00083} \cdot 100 \% = 19,3 \%$ ).



Рис. 7. Последствия процесса подтопления в городе Называевске, конец июня 2016 г.

Fig. 7. Effects of flooding in Nazyvaevsk, the end of June, 2016

Полученные результаты не отражают детально сложившуюся ситуацию, так как не учитывают многих факторов, таких как испарение, влияние вертикального стока с мест с более высоким рельефом (отчасти данная погрешность нивелируется расчетами по стоку в последний период зимнего снижения уровня), четкие показатели сброса воды на рельеф и многое другое. Но приведенные расчеты и графики позволяют охарактеризовать картину в целом.

Серьезная ситуация с подтоплениями в городе Называевске приводит к тому, что разрушаются объекты инфраструктуры, здания, наносится огромный ущерб сельскому хозяйству, кардинальные изменения происходят в биоценозе. Водонасыщенные грунты приводят к оседанию конструкций и сооружений в виду уменьшения модуля деформации [20–23], что затрудняет, а иногда и вовсе исключает их дальнейшую эксплуатацию. Падают опоры ЛЭП, и даже в конце июня местами сохраняются подтопленные жилые здания (рис. 7).

#### Выводы

Рассматривая полученные данные по грунтовым водам города Называевска, можно заключить следующее:

1. Кардинальные изменения в балансе грунтовых вод возникли со второй половины 80-х гг. и в

первую очередь связаны с проблемами в их разгрузке (вертикальном стоке), которая существует даже в период минимальной подпитки в феврале месяце.

2. Определенно сложившаяся ситуация связана прежде всего с вмешательством человека в естественные процессы формирования грунтовых вод, и основные причины нужно искать именно в последних десятилетиях XX в., когда нарушилась приходно-расходная часть скапливающихся вод голоценовых отложений и происходила застройка города.
3. В последнее десятилетие возникла критическая ситуация, приводящая к регулярным подтоплениям, перерастающим в серьезные проблемы во время сезонов обильного насыщения грунтов талыми и дождевыми водами, возможность разгрузки которых существенно ограничена.
4. Если не решать проблему подтоплений в Называевске в ближайшее время, то существует огромный риск превращения некогда активно развивающегося города в разрастающееся болото.
5. Необходимо решать проблему отвода «лишней воды» с территории города, в чем мог бы помочь водоотводный канал, регулирующий поверхностный сток и нивелирующий подземный.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арефьева Е.В., Мухин В.И., Мирмович Э.Г. Подтопление как потенциальный источник ЧС // Технологии гражданской безопасности. – 2007. – № 4. – С. 69–73.
2. Называевск // Свободная энциклопедия Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Называевск> (дата обращения: 05.09.2016).
3. Калинин Н.А., Володченкова Л.А., Гуц А.К. Прогнозирование экологических кризисов лесных фитоценозов // Вестник ОмГУ. – 2009. – № 4. – С. 74–76.
4. Володченкова Л.А., Гуц А.К. Математическое моделирование стадий вымокания берёзовых лесов с помощью теории катастроф // МСМ. – 2011. – № 3 (24). – С. 19–33.
5. Лебедев А.В. Оценка баланса подземных вод. – М.: Недра, 1989. – 174 с.
6. Оленьков В.Д., Шукутин Е.В. Природные циклы подтопления территорий и учет их в градостроительном планировании // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2007. – № 22 (94). – С. 60–63.
7. Большаник П.В., Недбай В.Н. Геоэкологические проблемы крупнейших городов в связи с регуляцией речного стока (на примере г. Омска) // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 1 (24). – С. 61–73.
8. Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории Томской области // Известия ТПУ. – 2004. – № 4. – С. 60–63.

9. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain the health of groundwater dependent vegetation / D. Eamus, R. Froend, R. Loomes, G. Hose, B. Murray // *Aust. J. Bot.* – 2006. – № 54. – P. 97–114. URL: <http://www.publish.csiro.au/bt/BT05031> (дата обращения: 08.06.2016).
10. Fleming S.W., Quilty E.J. Aquifer Responses to El Nino-Southern Oscillation. Southwest British Columbia // *Ground Water*. – 2007. – № 44 (4). – P. 595–599. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-6584.2006.00187.x/full> (дата обращения: 17.08.2016).
11. Fluctuation of Groundwater Levels and Recharge Patterns in Northern Ghana / A. Lutz, S. Minyila, B. Saga, S. Diarra, B. Arambire, J. Thomas // *Climate*. – 2015. – № 3. – P. 1–15. URL: <http://www.mdpi.com/2225-1154/3/1/1> (дата обращения: 18.08.2016).
12. Методические подходы к оценке степени дренированности урбанизированных территорий / В.Д. Покровский, Е.М. Дутова, А.Н. Никитенков, К.И. Кузеванов, Д.С. Покровский // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 1–2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20130> (дата обращения: 17.08.2016).
13. О формировании водного стока на осваиваемых территориях / А.Я. Гаев, В.Э. Бикитеев, И.В. Куделина, Т.В. Леонтьева, Л.А. Кременцова // *Вестник Пермского университета. Геология*. – 2014. – № 2. – С. 33–40.
14. Самим не справиться с подтоплением. Району нужна помощь из федерального бюджета // *Наша Искра*. 5 февраля 2016. № 6. URL: <http://www.nasha-iskra.ru/View.asp?objType=2&objValue=87034&> (дата обращения: 06.05.2016).
15. Ponce V.M., Lohani A.K., Huston P.T. Surface albedo and water resources: Hydroclimatological impact of human activities // *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*. – 1997, October. – V. 2. – № 4. – P. 197–203. URL: <http://ponce.sdsu.edu/albedo197.html> (дата обращения: 10.08.2016).
16. Alley W.M., Reilly T.E., Franke O.E. Sustainability of groundwater resources // *U.S. Geological Survey Circular 1186*. – Denver, Colorado, 1999. – 79 p. URL: <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1186> (дата обращения: 10.08.2016).
17. Groundwater pollution and quality monitoring approaches at the European level / B. Kløve, Z. Nakic, E. Preda, S. Ruzicic, P. Wachniew, M. Trevisan // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* – 2013. – № 43. – P. 323–408. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2011.604259> (дата обращения: 25.08.2016).
18. Monitoring and Modeling the Effects of Groundwater Flow on Arsenic Transport in Datong Basin / Q. Yu, Y.X. Wang, R. Ma et al. // *Journal of Earth Science*. – 2014. – № 25 (2). – P. 386–396.
19. СП 131.133.30.2012 «Строительная климатология» Актуализированная редакция СНиП 23-01-99 с изменением № 2 от 01.12.2015 г. – М.: Минстрой, 2015. – 109 с.
20. Пономарев А.Б., Калошина С.В., Салимгариева Н.И. Влияние процесса подтопления на физико-механические свойства грунтов // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. – 2013. – № 1. – С. 67–70.
21. Ведение мониторинга геологической среды города Казани / А.И. Шевелев, Н.И. Жаркова, Ю.П. Бубнов, А.И. Латыпов, И.А. Хузин, Р.К. Галеев // *Георесурсы*. – 2014. – № 3 (58). – С. 3–8.
22. Galloway D., Jones D.R., Ingebritsen S.E. Land subsidence in the United States // *U.S. Geological Survey Circular 1182*. – Denver, Colorado, 2001. – 175 p. URL: <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1182> (дата обращения: 27.07.2016).
23. Kvarner J., Snilsberg P. Groundwater hydrology of boreal peatlands above a bedrock tunnel – drainage impacts and surface water groundwater interactions // *J. Hydrol.* – 2011. – № 403. – P. 278–291. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002460> (дата обращения: 27.07.2016).

Поступила 29.03.2017 г.

#### Информация об авторах

**Медведков К.С.**, аспирант кафедры промышленной экологии и безопасности Омского государственного технического университета; заместитель генерального директора по производству АО «Омская геологоразведочная экспедиция».

**Штриплинг Л.О.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности, проректор по учебно-методической работе Омского государственного технического университета.



UDC 556.3; 551.4

## ANALYSIS OF FLOODED AREAS ON THE EXAMPLE OF GROUND WATERS IN NAZYVAEVSK

Kirill S. Medvedkov<sup>1,2</sup>,  
kmedvedkov@mail.ruLev O. Shtripling<sup>1</sup>,  
los@omgtu.ru<sup>1</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.<sup>2</sup> Omsk Geological Expedition,  
16, Gusarov street, Omsk, 644007, Russia.

Relevance of the research is caused by increasing negative impact of flooding areas, increasing damage, and reduced quality of life in the flooded areas. Directly in the Nazyvaevsk area more than 40 % of the area is flooded, and in the town more than half of the population suffers from flood. All these facts contributed to the choice of groundwater in Nazyvaevsk as the object of the research.

**The main aim** of the study is to identify the causes of flooding, search for solutions to stabilize the situation of high level of ground water, predict the changes based on infiltration.

**The methods used in the study:** analysis of long-term observations of the ground water wells subsurface regime, identifying dependencies and graphical-analytical calculation of infiltration on the basis of the data collected.

**Results.** The authors have analyzed the situation in areas with high levels of ground water with riverine (Tyukalinsk) and interfluvial (Nazyvaevsk) mode. Tyukalinsk has greater opportunities in input-output balance of ground water and can neutralize anthropogenic impact due to Tyukalka River, which provides natural drainage. Territory of Nazyvaevsk has poor drainage conditions, as there are no rivers there, and flat relief, so the changes in the input balance of ground water has a significant impact on the situation with flooding. The study revealed a large man-made contribution to the balance of ground water of Nazyvaevsk, which led to serious problems with flooding at the region since 1980 to the present. According to preliminary calculations, this contribution is about 19,3 %.

**Key words:**

Underground water, magnitude of infiltration, discharge, flooding, human activities, poor drainage, regime, well of groundwater, observations, ground water level.

## REFERENCES

1. Arefeva E.V., Mukhin V.I., Mirmovich E.G. Podtoplenie kak potentsialny istochnik ChS [Submergence as a potential source of EC]. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*, 2007, no. 4, pp. 69–73.
2. Nazyvaevsk. *Wikipedia*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nazyvayevsk> (accessed 5 September 2016).
3. Kalinenko N.A., Volodchenkova L.A., Guts A.K. Prognozirovaniye ekologicheskikh krizisov lesnykh fitotsenozov [Prediction of environmental crises of forest communities]. *Herald of Omsk University*, 2009, no. 4, pp. 74–76.
4. Volodchenkova L.A., Guts A.K. Matematicheskoe modelirovaniye stadii vymokaniya berezovykh lesov s pomoshchyu teorii katastrof [Mathematical modeling of birch forest waterlogging stage by the theory of catastrophes]. *MSiM*, 2011, no. 3 (24), pp. 19–33.
5. Lebedev A.V. *Otsenka balansa podzemnykh vod* [Assessing the balance of groundwater]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 174 p.
6. Olenkov V.D., Shukutina E.V. Prirodnye tsikly podtopleniya territorii i uchet ikh v gradostroitelnom planirovaniy [Natural cycles of flooding areas and keeping them in urban planning]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction engineering and architecture*, 2007, no. 22 (94), pp. 60–63.
7. Bolshaniy P.V., Nedbay V.N. Geoekologicheskie problemy kruneyshikh gorodov v svyazi s regulyatsiyey rechnogo stoka (na primere g. Omska) [Environmental problems of the largest cities in relation to regulation of river flow (by the example of Omsk)]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 1 (24), pp. 61–73.
8. Savichev O.G., Makushin Yu.V. Longterm changes of the level regime of ground waters of the upper hydrodynamic zone of Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 4, pp. 60–63. In Rus.
9. Eamus D., Froend R., Loomes R., Hose G., Murray B. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain the health of groundwater dependent vegetation. *Aust. J. Bot.*, 2006, no. 54, pp. 97–114. Available at: <http://www.publish.csiro.au/bt/BT05031> (accessed 8 June 2016).
10. Fleming S.W., Quilty E.J. Aquifer Responses to El Nino-Southern Oscillation. Southwest British Columbia. *Ground Water*, 2007, no. 44 (4), pp. 595–599. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-6584.2006.00187.x/full> (accessed 17 August 2016).
11. Lutz A., Minyila S., Saga B., Diarra S., Apambire B., Thomas J. Fluctuation of Groundwater Levels and Recharge Patterns in Northern Ghana. *Climate*, 2015, no. 3, pp. 1–15. Available at: <http://www.mdpi.com/2225-1154/3/1/1> (accessed 18 August 2016).
12. Pokrovsky V.D., Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Kuzevanov K.I., Pokrovsky D.S. Methodological approaches to assessing the degree of fitness of the urbanized territories. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1–2. In Rus. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20130> (accessed 17 August 2016).
13. Gaev A.Ya., Bikiteev V.E., Kudelina I.V., Leonteva T.V., Kremntsova L.A. O formirovaniy vodnogo stoka na osvivaemykh territoriyakh [On formation of runoff on the reclaimed areas]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2014, no. 2, pp. 33–40.
14. Samim ne spravitsya s podtopleniem. Rayonu nuzhna pomoshch iz federalnogo byudzheta [We cannot cope with flooding ourselves. The district needs help from the federal budget]. *Nasha iskra*. February 5, 2016. Available at: <http://www.nasha-iskra.ru/View.asp?objType=2&objValue=87034&> (accessed 6 May 2016).



15. Ponce V.M., Lohani A.K., Huston P.T. Surface albedo and water resources: Hydroclimatological impact of human activities. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 1997, October, vol. 2, no. 4, pp. 197–203. Available at: <http://ponce.sdsu.edu/albedo197.html> (accessed 10 August 2016).
16. Alley W.M., Reilly T.E., Franke O.E. Sustainability of groundwater resources. *U.S. Geological Survey Circular 1186*. Denver, Colorado, 1999. 79 p. Available at: <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1186> (accessed 10 August 2016).
17. Kløve B., Nakic Z., Preda E., Ruzicic S., Wachniew P., Trevisan M. Groundwater pollution and quality monitoring approaches at the European level. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 2013, no. 43, pp. 323–408. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2011.604259> (accessed 25 August 2016).
18. Yu Q., Wang Y.X., Ma R. Monitoring and Modeling the Effects of Groundwater Flow on Arsenic Transport in Datong Basin. *Journal of Earth Science*, 2014, no. 25 (2), pp. 386–396.
19. SP 131.133.30.2012 «*Stroitel'naya klimatologiya*» [Set of rules 131.133.30.2012. Building climatology]. Moscow, Minstroy Publ., 2015. 109 p.
20. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V., Salimgarieva N.I. Vliyanie protsessov podtopleniya na fiziko-mekhanicheskie svoystva gruntov [Flooding impact on physical and mechanical properties of soils]. *Akademicheskyy vestnik UralNIIproekt RAASN*, 2013, no. 1, pp. 67–70.
21. Shevelev A.I., Zharkova N.I., Bubnov Yu.P., Latypov A.I., Khuzin I.A., Galeev R.K. Vedenie monitoringa geologicheskoy sredy goroda Kazani [Monitoring of geological environment in Kazan]. *Georesources*, 2014, no. 3 (58), pp. 3–8.
22. Galloway D., Jones D.R., Ingebritsen S.E. Land subsidence in the United States. *U.S. Geological Survey Circular 1182*. Denver, Colorado, 2001. 175 p. Available at: <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1182> (accessed 27 July 2016).
23. Kværner J., Snilsberg P. Groundwater hydrology of boreal peatlands above a bedrock tunnel – drainage impacts and surface water groundwater interactions. *J. Hydrol.*, 2011, no. 403, pp. 278–291. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002460> (accessed 27 July 2016).

Received: 29 March 2017.

#### Information about the authors

**Kirill S. Medvedkov**, postgraduate student, Omsk State Technical University; deputy director, Omsk Geological Expedition.

**Lev O. Shtripling**, Dr. Sc., professor, head of the department, vice rector, Omsk State Technical University.

УДК 549.324:549.326:550.84:552.56

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПИРРОТИНА И ГРЕЙГИТА В ПОРОДАХ БАКЧАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ

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

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

Рубан Алексей Сергеевич<sup>1</sup>,  
ruban@tpu.ru

Усольцев Дмитрий Георгиевич<sup>1</sup>,  
usoltsev\_d@mail.ru

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

*В последнее время образование пирротина и грейгита в осадочных породах всё чаще связывают с сульфат-метановыми транзитными зонами современных отложений. В работе рассматриваются метаногенерирующие процессы как одни из возможных механизмов формирования сульфидов железа в осадочных породах Бакчарского месторождения.*

*Основная цель работы заключается в восстановлении условий формирования ферромагнитных сульфидов в породах Бакчарского месторождения для раскрытия режимов и процессов, протекающих в осадках древнего эпиконтинентального Западно-Сибирского моря на границе палеоцена и эоцена, а также для объяснения высокой намагниченности этих пород.*

*Авторами были проведены минералогические (сканирующая электронная микроскопия, рентгенодифракционный анализ), геофизические (каппаметрия), геохимические (рентгенофлуоресцентный анализ, ИСП-МС) исследования пород (образцы из керна скважин), содержащих пирротин и грейгит, с целью восстановления развития специфических постосадочных процессов в пределах шельфа древнего Западно-Сибирского моря.*

*В результате проведенных исследований выдвигается теория об образовании ферромагнитных сульфидов в отложениях Бакчарского месторождения в условиях диффундирующего вверх флюида метана и ограниченного количества сульфид-иона. Эта обстановка обогащалась палеоокислительными (Mo, U, V) и палеопродуктивными индексами ( $Va_{90}$  и P). Породы, содержащие пирротин и грейгит, обладают высокой магнитной восприимчивостью (выше  $80 \cdot 10^{-5}$  СИ), что является полезным свойством для их идентификации в кернах скважин методами магнитного каротажа. Наличие пирротина и грейгита в осадочных породах может служить предпосылкой для обнаружения газовых залежей в палеоцен-эоценовом разрезе Западной Сибири. Выбросы метана в пределах древнего Западно-Сибирского моря, вероятно, провоцировали подводные оползневые процессы и оказывали непосредственное влияние на глобальное изменение климата на границе палеоцена и эоцена.*

### Ключевые слова:

Пирротин, грейгит, ферромагнитные сульфиды, сидерит, диагенез, сульфат редукция, метан, магнитная восприимчивость, палеоцен, эоцен, условия осадкообразования, Бакчарское месторождения, Западная Сибирь.

### Введение

В настоящее время отдельное внимание уделяется изучению ферромагнитных сульфидных минералов в морских осадочных породах. К ним относятся грейгит ( $Fe_3S_4$ ) и моноклинный пирротин ( $Fe_7S_8$ ) [1, 2]. Наличие этих минералов, как правило, обеспечивает относительно высокие показатели магнитной восприимчивости в осадочных породах [3–5]. Понимание происхождения ферромагнитных сульфидов позволяет раскрыть условия специфических седиментационных и диагенетических процессов в морских осадочных средах [6–11], а также оценить надежность палеомагнитных данных этих отложений [3, 4, 9, 12].

На сегодняшний момент существует несколько теорий о природе магнитных сульфидов железа в осадочных отложениях: диагенетическая [1, 6, 9, 11], обломочная [13, 14] и гидротермальная [15, 16]. Находки этих минералов изучены в осадках Чер-

ного моря [7, 8], желоба Нанкай (Nankai Trough) на внешнем шельфе Японии [4, 11], Гидратного хребта (Hydrate Ridge) на внешнем шельфе Орегона [9], на континентальном шельфе Желтого моря [17], на острове Тайвань [12–14] и т. д. Известно, что в диагенезе ферромагнитные сульфиды могут образовываться под действием сульфат-редукции [18], анаэробного окисления метана [7, 8, 19] и газогидратных систем [9, 11, 20].

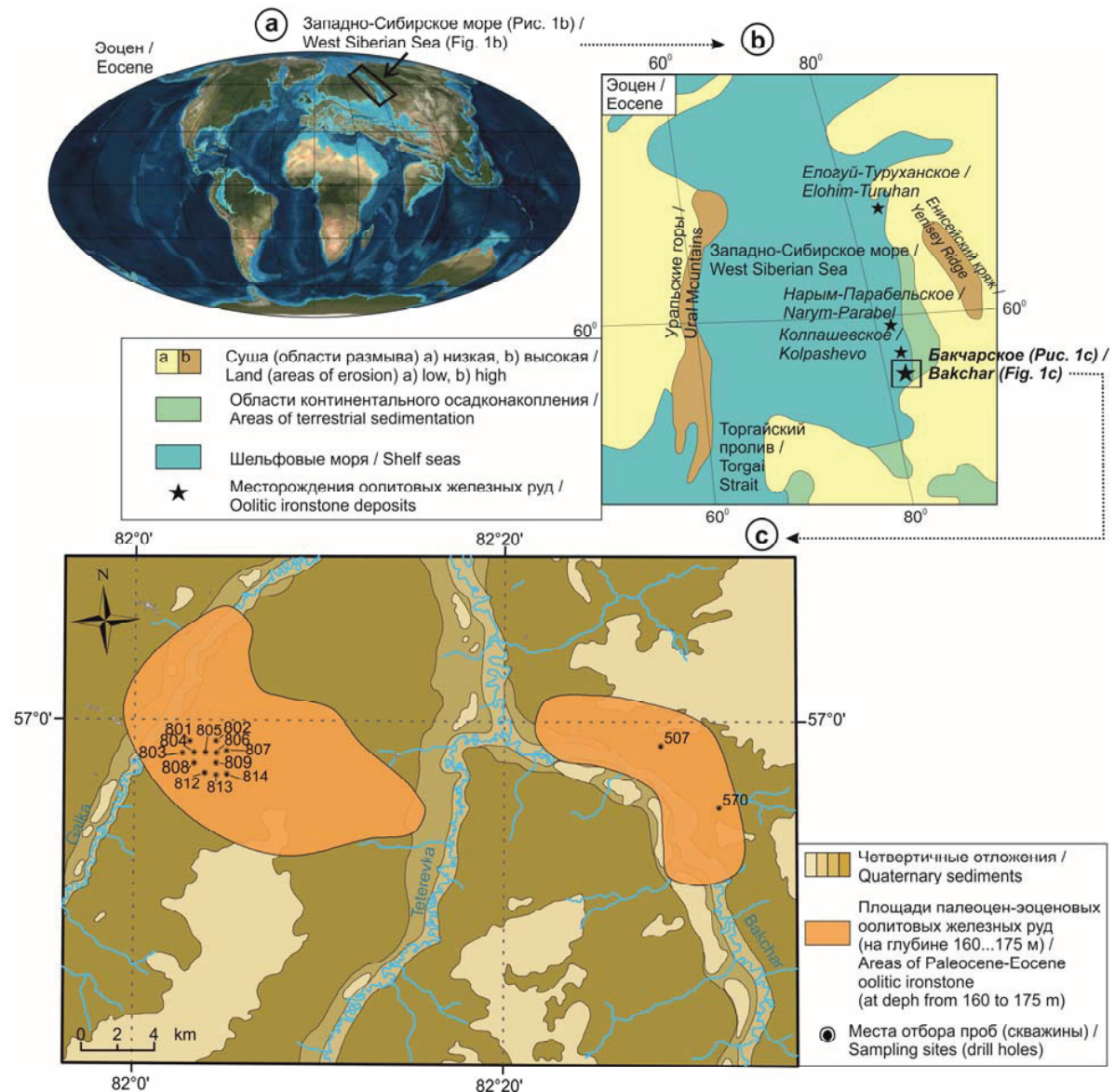
В последнее время образование этих минералов всё чаще связывают с воздействием метана на морские осадки [4, 7–9, 11]. Это важно, поскольку, по мнению многих ученых, выбросы метана в атмосферу сыграли важную роль в глобальном изменении климата в прошлом [21], а также оказывают весомое влияние на климат в настоящее время [22]. Примером глобального изменения климата в прошлые эпохи служит палеоцен-эоценовый термальный максимум [23, 24]. Известно, что одними

из важнейших процессов, которые спровоцировали резкое изменение климата на границе палеоцена и эоцена, послужили глобальные выбросы метана [24–27].

Основная цель данной работы заключается в реконструкции условий формирования ферромагнитных сульфидов в оолитовых железняках Бакчарского месторождения для понятия режимов и процессов, протекающих в осадках древнего эпиконтинентального Западно-Сибирского моря на границе палеоцена и эоцена, а также для объяснения высокой намагниченности этих пород.

### Геологические условия

Бакчарское месторождение находится в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины (рис. 1, a, b) и является основным месторождением Западно-Сибирского железорудного бассейна [28]. По данным биостратиграфии формирование оолитовых железняков Бакчарского месторождения занимает промежуток от турона до эоцена [29, 30]. Оолитовые железняки залегают среди морских песчаников, алевролитов и глин. Они приурочены к прибрежной области древнего эпиконтинентального Западно-Сибирского моря (рис. 1, a) и тем са-



**Рис. 1.** (a) Обзорная карта расположения изучаемого региона в эоцене (измененная после [31]); (b) Палеогеографическая карта Западной Сибири в эоцене с добавлениями месторождений оолитовых железных руд (измененная после [32]); (c) Геологическая карта Бакчарского месторождения с площадью распространения палеоцен-эоценовых оолитовых железных руд (измененная после [28])

**Fig. 1.** (a) Location map of the studied region at Eocene (modified after [31]); (b) Paleogeographical map of Western Siberia at Eocene with oolitic ironstone deposits (modified after [32]); (c) Geological map of Bakchar deposit showing the areas of distribution of Paleocene-Eocene oolitic ironstone (modified after [28])



мым распространены вдоль юго-восточного обрамления Западной Сибири [28].

Оолитовые железняки в основном состоят из шамозит-гетитовых оолитов, ооидов, терригенного кварца и полевых шпатов, которые в разной степени цементируются гидрослюдистым, шамозитовым или сидеритовым цементом [33–35]. Изучаемые отложения относятся к верхней части железомещающей толщи, так называемому бакчарскому горизонту, и, по данным биостратиграфии [28, 30], соответствуют палеоцен-эоценовому периоду. Осадочные породы характеризуются переменными значениями магнитной восприимчивости [36, 37].

#### Материал и методика исследований

Для минералого-геохимических исследований было отобрано более 30 образцов из керна скважин Бакчарского месторождения с интервала 160...175 м (рис. 1, с). Магнитная восприимчивость (MS) была измерена в керне скважин при помощи кашпометра КТ-10 (чувствительность  $1 \cdot 10^{-6}$  СИ). Измерения проводились с интервалом 20 см.

Ферромагнитные сульфиды изучались в образцах при помощи рентгенодифракционного анализа и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) [6, 9, 38, 39]. Рентгенодифракционный анализ выполнялся на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser при параметрах измерения 40 кВ и 40 мА. СЭМ проводилась для полированных шлифов с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного детектором для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа было 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 3,5...15 нА. СЭМ с ЭДС анализом позволила заверить наличие осадочных сульфидов железа и отличить друг от друга пирротин, грейгит, пирит [6, 38].

Силикатный анализ 26 истертых образцов (менее 250 мкм) был выполнен при помощи рентгенофлуоресцентного анализа (HORIBA X-Ray Analytical Microscope XGT 7200, при параметрах 15...50 кВ, 1...100 мА, 100 с, площадь луча 1,2 мм) с пределом обнаружения основных оксидов до 0,01 %. Элементы примеси определялись при помощи масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Подготовка проб для ICP-MS выполнялась по методике, детально описанной в [40].

Все элементы нормировались на Al, чтобы исключить влияние терригенного материала на геохимические индикаторы [41, 42]. Al как правило имеет обломочное происхождение и обычно неподвижен во время биологических и диагенетических процессов [43]. Для каждого образца и элемента высчитывался фактор обогащения (EF) по формуле [42]:  $X \text{ EF} = (X/Al) / (X_{\text{PAAS}}/Al_{\text{PAAS}})$ , где  $(X_{\text{PAAS}}/Al_{\text{PAAS}})$  – нормализованное на Al concentra-

ции X элемента в PAAS по [44]. Если  $\text{EF} > 1$ , то это свидетельствует об аутигенном обогащении элемента над средней концентрацией постаршейского австралийского сланца, а если  $\text{EF} > 10$ , то это свидетельствует об умеренной или сильной степени аутигенного обогащения металла [42].

Биогенный барий, как индикатор морской палеопродуктивности, был рассчитан по формуле [45]:  $Ba_{\text{bio}} = Ba_{\text{total}} \cdot (Al \cdot (Ba/Al)_{\text{detr}})$ . В этом уравнении  $(Ba/Al)_{\text{detr}}$  представляет собой отношение  $Ba/Al$  (0,0037) как глобальный коэффициент, предложенный А. Рейтцом [46].

#### Результаты

##### Литология и условия залегания

Палеоценовые отложения Бакчарского месторождения начинаются с желтовато-серых песчаников, которые вверх по разрезу сменяются оолитовыми железняками (рис. 2). Мощность песчаников может достигать 11,5 м. Подстилаются палеоценовые отложения маастрихтскими оолитовыми железняками или глауконитовыми песчаниками. Мощность палеоценовых оолитовых железняков изменяется от 2,5 до 22 м. Толща палеоценовых оолитовых железняков обычно имеет двухчленное строение. Залегające внизу сыпучие железняки (мощность 0,2...11,4 м) постепенно переходят в крепкие железняки с сидеритовым цементом (мощность 0,2...7,7 м). Далее вверх по разрезу оолитовые железняки через линзы железистых гравелитов (мощностью от 0,1 до 1,1 м) сменяются параллельно слоистыми эоценовыми гидрослюдистыми глинами средней мощностью 12,5 м.

Маастрихтские оолитовые железняки (рис. 3, а) имеют коричневатую-серую окраску, среднезернистые. Состоят из терригенных обломков (30...40 %), шамозит-гетитовых ооидов (20...25 %), глауконита (8...20 %) с шамозитовым цементом. В шамозитовом матриксе обычно отмечаются микрокристаллы сидерита и в редких случаях сфалерит, фрамбоиды пирита, апатит. Маастрихтские глауконитовые песчаники имеют мелкозернистую структуру и серовато-зеленый цвет. Состоят из кварца (40...54 %), глауконита (22...33 %), шамозит-гетитовых ооидов (5...20 %) с шамозитовым цементом.

Палеоценовые песчаники (рис. 3, б) имеют среднезернистую структуру, желтовато- или зеленовато-серую окраску. Песчаники состоят из терригенных обломков (55...60 %) кварца и полевых шпатов, шамозит-гетитовых ооидов (10...45 %), глауконита (3...15 %) и шамозитового цемента. В цементе песчаников образуются фрамбоиды пирита. Оолитовые железняки с аморфным гидрогетитовым цементом (рис. 3, с) состоят из кварца (20...30 %), шамозит-гетитовых оолитов (40...60 %) и глауконита (до 5 %). Сыпучие оолитовые железняки (рис. 4, а) имеют среднезернистую структуру и черный цвет. Состоят из шамозит-гетитовых оолитов (70...80 %) и терригенных обломков кварца (20...30 %). Крепко сцементированные железняки (рис. 3, д) имеют среднезерни-



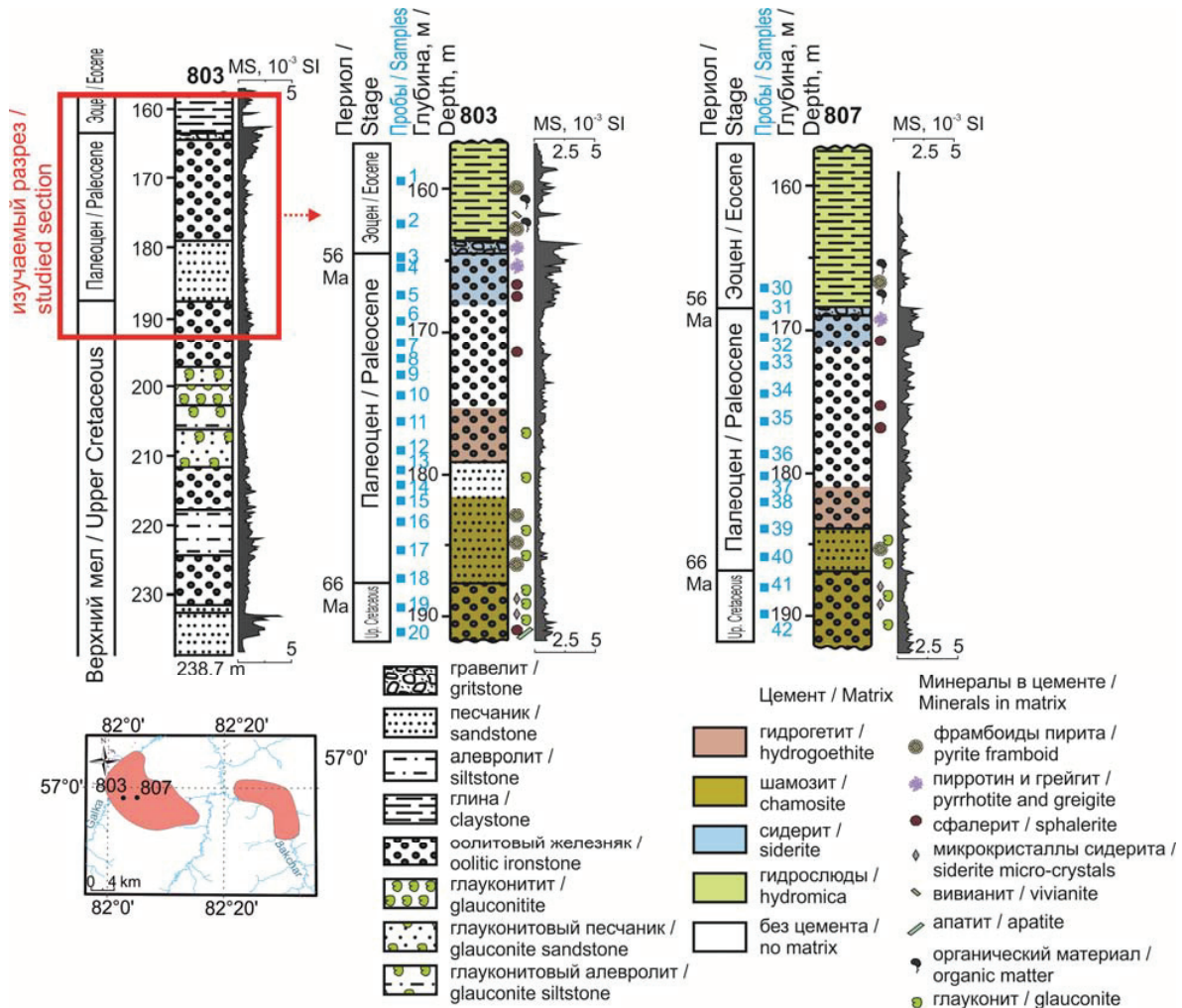


Рис. 2. Стратиграфические колонки Бакчарского месторождения с вертикальными профилями магнитной восприимчивости

Fig. 2. Stratigraphic columns of Bakchar deposit with magnetic susceptibility profile

стую структуру и коричневатый-черный цвет. Состоят из шамозит-гетитовых оолитов (50...60 %), кварца (5...10 %) и сидеритового цемента. Железистые гравелиты (рис. 4, b) имеют табачный цвет. Состоят из крупных обломков кварца, оолитов, глауконита с сидеритовым цементом.

Эоценовые глины параллельнослоистые с зеленовато-серым цветом с прослоями и линзами алевролита (рис. 4, c). Глины гидрослюдистые с органическим материалом, вивианитом (в редких случаях), фрамбоидами пирита (в подошве).

#### Магнитная восприимчивость

Профиль магнитной восприимчивости для всей железовмещающей толщи Бакчарского месторождения и для его палеоцен-эоценового разреза представлен на рис. 2. Магнитная восприимчивость палеоцен-эоценовых пород изменяется от 3,2 до  $658,4 \cdot 10^{-5}$  СИ (в среднем  $27,4...66,5$  СИ). Магнитная восприимчивость пород, содержащих грейгит и пирротин, отличается повышенными значениями –  $84,6...658,4 \cdot 10^{-5}$  СИ ( $140,5...232,8 \cdot 10^{-5}$  СИ в среднем),

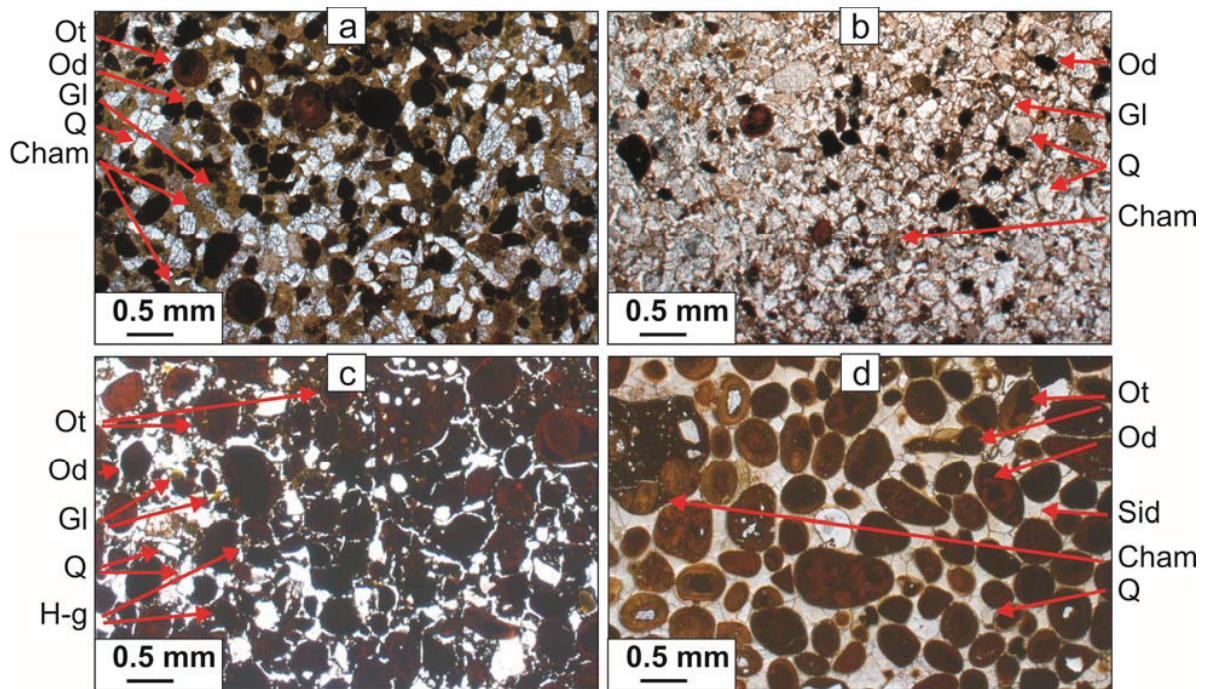
относительно оолитовых железняков и эоценовых глин ( $10,6...434,8 \cdot 10^{-5}$  СИ ( $44,8...100,5 \cdot 10^{-5}$  СИ в среднем) и  $3,2...299,3 \cdot 10^{-5}$  СИ ( $18,3...42,8 \cdot 10^{-5}$  СИ в среднем), соответственно).

#### Минералогия

Ферромагнитные сульфиды (пирротин и грейгит) в изучаемых палеоцен-эоценовых отложениях находятся в ассоциации с сидеритом и пиритом в осадочном цементе.

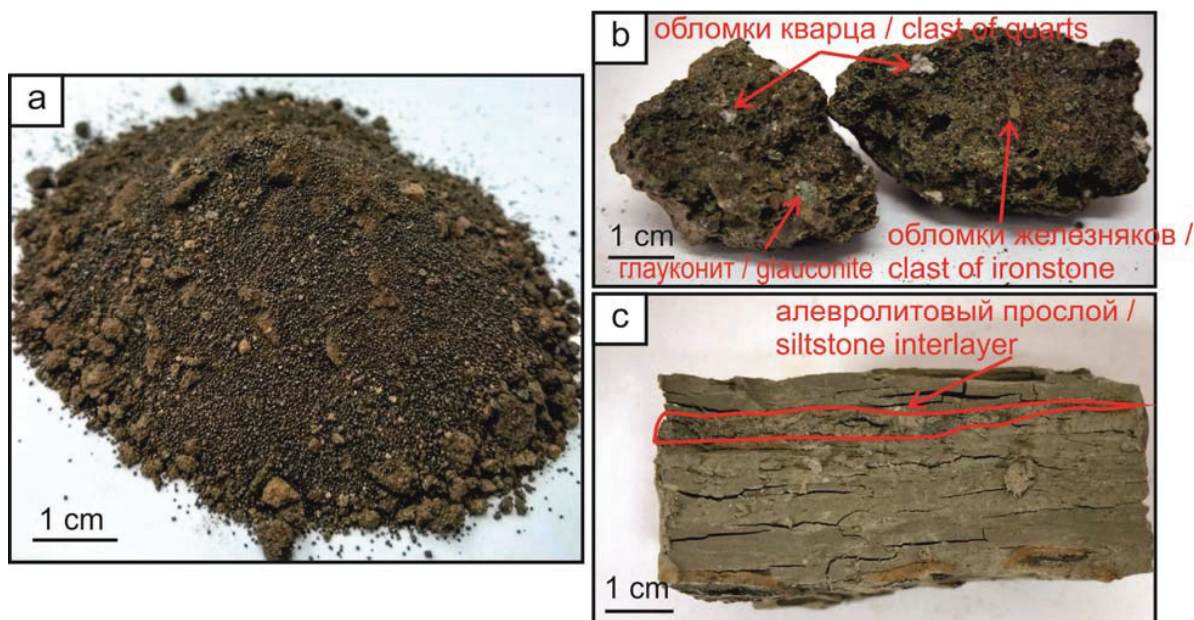
Среди сульфидов железа в породах Бакчарского месторождения наиболее распространен пирит (рис. 5). Пирит встречается в виде фрамбоидов (рис. 5, c), идиоморфных кристаллов (рис. 5, b) и полифрамбоидных агрегатов (рис. 5, a). Фрамбoids пирита состоят из мелких кристаллов. Иногда пирит образует полифрамбоидные агрегаты, каждый из которых состоит из нескольких индивидуальных фрамбоидов. Размер фрамбоидов изменяется от 3 до 46,6 мкм.

Данные рентгенодифракционного анализа всех образцов, содержащие пирротин, показывают пе-



**Рис. 3.** (а) Маастрихтские оолитовые железняки с шамозитовым цементом (образец 19); (б) Палеоценовый песчаник (образец 16); (с) Палеоценовый оолитовый железняк с гидрогетитовым цементом (образец 11); (д) Палеоценовый оолитовый железняк с сидеритовым цементом (образец 5); Ot – шамозит-гетитовые оолиты, Od – шамозит-гетитовые ооиды, Gl – глауконит, Q – кварц, Cham – шамозитовый цемент, Sid – сидеритовый цемент, H-g – гидрогетитовый цемент. Все фотографии сделаны в шлифах в проходящем свете (без анализатора)

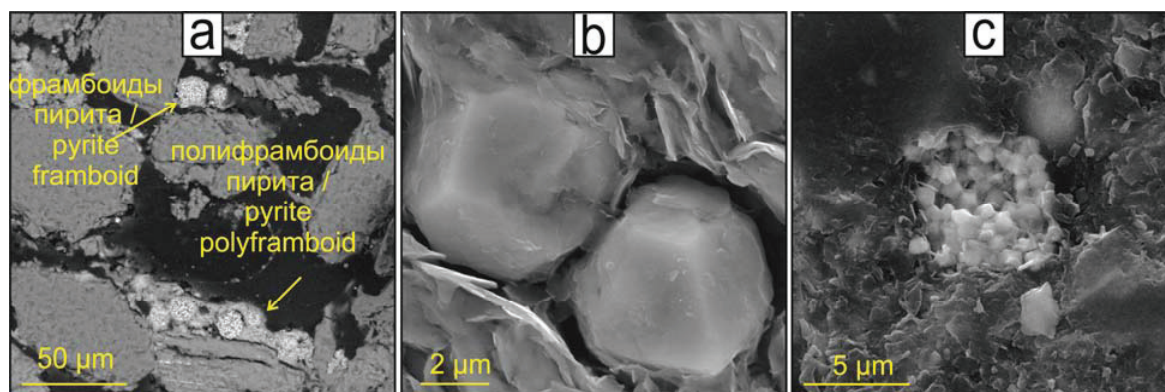
**Fig. 3.** (a) Maastrichtian oolitic ironstone with chamosite matrix (sample 19); (b) Paleocene sandstone (sample 16); (c) Paleocene oolitic ironstone with hydrogoethite matrix (sample 11); (d) Paleocene oolitic ironstone with siderite matrix (sample 5); Ot – chamosite-goethite oolites, Od – chamosite-goethite ooids, Gl – glauconite, Q – quartz, Cham – chamosite matrix, Sid – siderite matrix, H-g – hydrogoethite matrix. All photomicrographs are in thin-section and ordinary light



**Рис. 4.** (а) Палеоценовый сыпучий оолитовый железняк (образец 9); (б) Эоценовый гравелит с глауконитом, обломками железняков и кварцем (образец 3); (с) Эоценовые глины с прослоями алевролита (образец 2)

**Fig. 4.** (a) Paleocene loose oolitic ironstone (sample 9); (b) Eocene gritstone with glauconite, clasts of ironstone and quartz (sample 3); (c) Eocene claystone with siltstone interlayer (sample 2)





**Рис. 5.** (а) Франamboиды и полифрамamboиды пирита в эоценовой глине (образец 2); (b) Идиоморфный пирит в эоценовой глине (образец 1); (с) Франamboиды пирита в палеоэоценовом песчанике (образец 40). Снимки в обратно рассеянных (а) и вторичных (b, с) электронах

**Fig. 5.** (a) Pyrite framboids and polyframboids in Eocene claystone (sample 2); (b) Euhedral pyrite in Eocene claystone (sample 1); (c) Pyrite framboid in Paleocene sandstone (sample 40). Backscattered (a) and secondary (b, c) electron micrographs

ременные, относительно низкие, но измеримые количества моноклинного пирротина. Моноклинный пирротит выделяется по 5 основными отражениями. В частности, двойной пик при угле  $2\theta$  около  $44^\circ$  является диагностическим отражением для моноклинного пирротина.

Франamboиды пирита преобладают в оолитовых железняках, песчаниках и алевролитах с шамозитовым или глинистым цементом. В эоценовых глинах пирит наблюдается в линзах алевролита (рис. 5, а). В эоценовых гравелитах пирит ассоциируется с сидеритом, грейгитом (рис. 6, b) и пирротинном.

Грейгит и пирротин встречается в палеоэоценовых оолитовых железняках и гравелитах среди сидеритового цемента. Грейгит имеет неправильные и субизометричные агрегаты (рис. 6, a, b), в некоторых случаях в ассоциации с пиритом (рис. 6, b).

Пирротин встречается в виде железосульфидных нодулей (рис. 6, b–d). Эти нодули (примерно до 1 мм) имеют различную форму. Нодули часто имеют остроконечную (рис. 6, b, c) внешнюю поверхность и состоят из хаотично ориентированных тонких игольчатых кристаллов (рис. 6, b, c, e). Пирротин иногда прорастает в обломочных минералах (рис. 6, d) и сидеритовых конкрециях (рис. 6, b).

С ферромагнитными сульфидами железа всегда находится в ассоциации сидерит. Сидерит в палеоэоценовых отложениях является основным минералом цемента (рис. 7, a), иногда в ассоциации с шамозитом (рис. 7, b). В основании (подшве) крепко сцементированных оолитовых железняков сидерит является составной частью шамозит-сидеритового цемента, в котором часто встречается сфалерит (рис. 7, b). Сфалерит имеет сферическую, реже субидиоморфную форму. Сидерит полностью занимает межзерновое пространство в верхней части палеоэоценовых железняков, а также в эоценовых гравелитах. В этих породах он иногда образует конкреции (рис. 6, b) и ассоциируется с

пирротинном и грейгитом (рис. 6). В маастрихтских отложениях сидерит в виде агрегатов размером до 50 мкм присутствует в шамозитовом цементе (рис. 7, c), иногда со сфалеритом и апатитом (рис. 7, c).

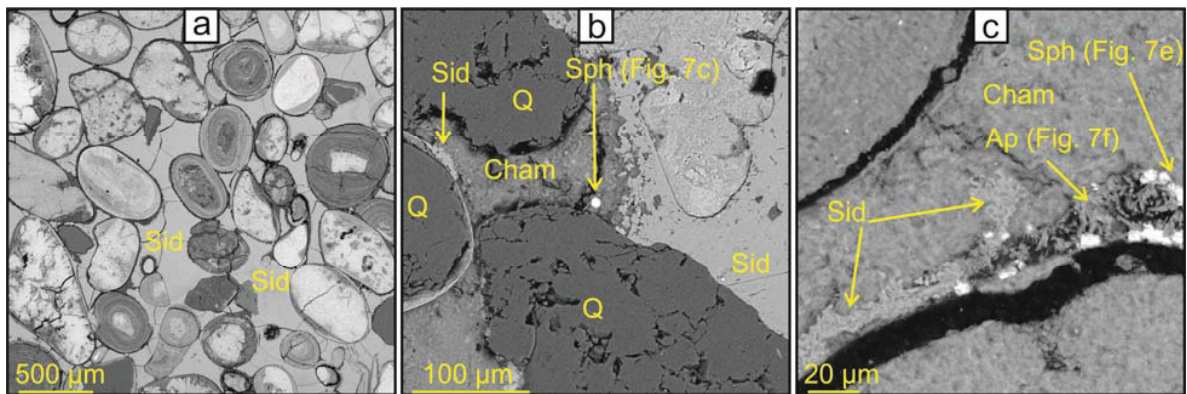
#### Геохимия

На рис. 8 показано вертикальное распределение основных элементов и факторов обогащения некоторых микроэлементов в изучаемом разрезе. Эти элементы, как правило, рассматриваются как надежные геохимические индикаторы для оценки влияния обломочного сноса (Al, Ti), окислительно-восстановительных условий (Mo, U, V) и первичной продуктивности (Ba, Zn, Cu, P) в морской осадочной среде [41, 42, 47, 48].

Ti имеет сильную корреляцию с Al ( $>0,75$ ), что доказывает его терригенную природу. Колебания фактора обогащения Ti в разрезе связаны с изменением притока обломочного материала [42, 47]. Другие элементы (Mo, U, V, Ba, Zn, Cu, P) имеют биогенное или аутигенное происхождение [41, 47], что подтверждается их слабой корреляцией с Al ( $<0,6$ ), вплоть до её отсутствия.

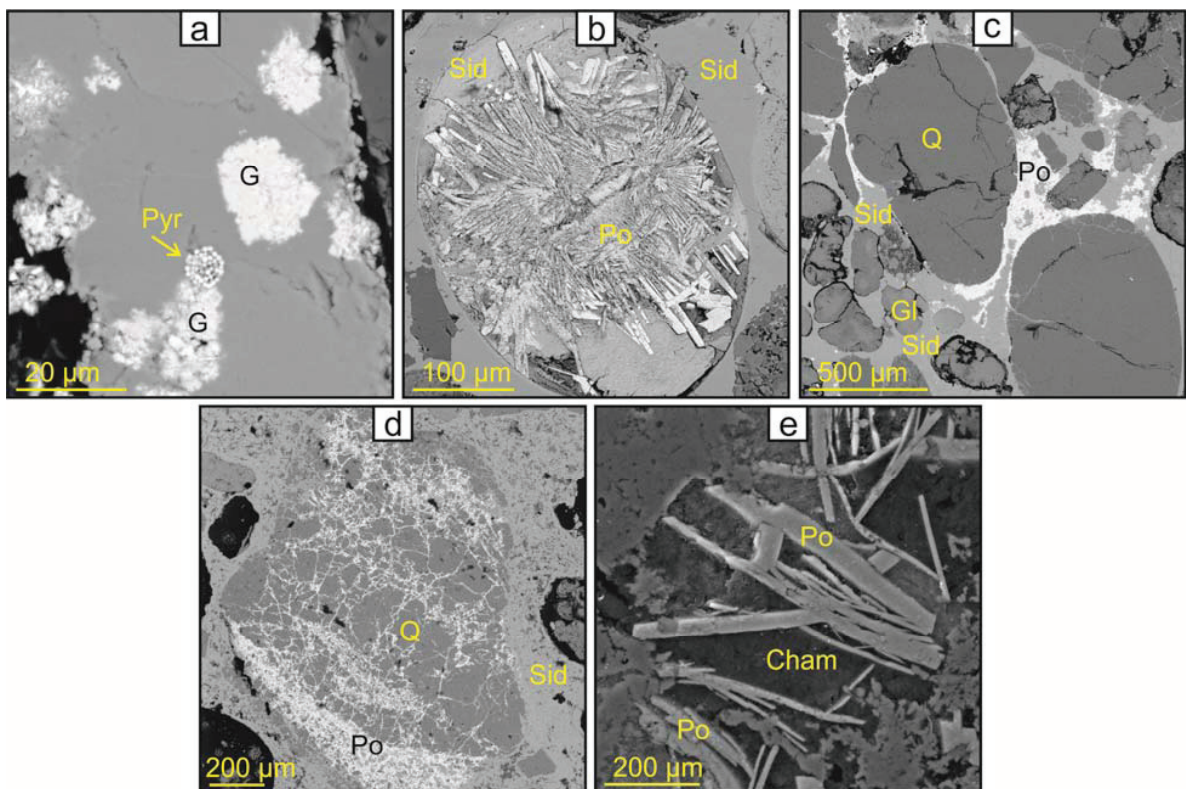
В верхнем палеоэоцено Бакчарского месторождения факторы обогащения геохимических индикаторов палеоокислительных обстановок относительно стабильны и достигают высоких значений (15 для Mo, 18 для U, 37 для V). Их пики регистрируются для оолитовых железняков с сидеритовым цементом и включениями ферромагнитных сульфидов. Эти индикаторы коррелируют с факторами обогащения P и Fe. Факторы обогащения P и Fe характеризуются высокими значениями и изменяются в пределах 3,1...30,9 для P, и 6,8...36,5 для Fe.

Увеличению значений факторов обогащения палеоредокс индикаторов предшествуют пики содержания биогенного бария, соответствующие маастрихтским и нижнепалеоэоценовым породам. Другой пик биогенного бария фиксируется на границе



**Рис. 7.** (а) Сидеритовый цемент в эоценовом оолитовом железняке (образец 32); (б) шамозит-сидеритовый цемент с субдиоморфным сфалеритом в палеоценовом оолитовом железняке (образец 5); (с) шамозитовый цемент с сидеритом, сфероидальным сфалеритом и апатитом в маастрихтском оолитовом железняке (образец 20). Снимки в обратно-рассеянных электронах. Sid – сидерит, Q – кварц, Cham – шамозит, Sph – сфалерит, Ap – апатит

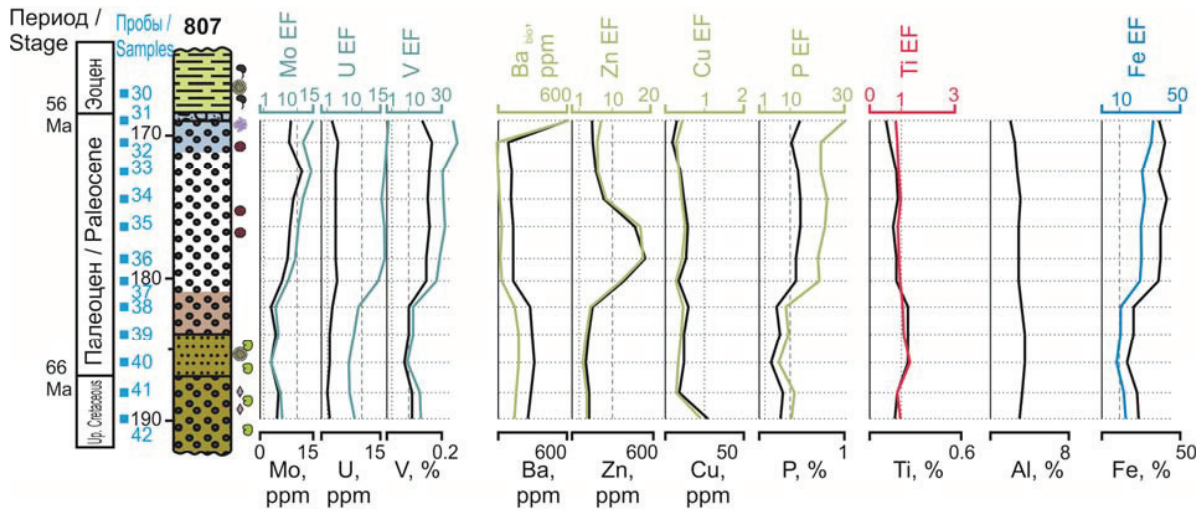
**Fig. 7.** (a) Siderite matrix in Eocene oolitic ironstone (sample 32); (b) chamosite-siderite matrix with subhedral sphalerite in Paleocene oolitic ironstone (sample 5); (c) chamosite matrix with siderite, spheroidal sphalerite and apatite in Maastrichtian oolitic ironstone (sample 20). Backscattered electron micrographs. Sid – siderite, Q – quartz, Cham – chamosite, Sph – sphalerite, Ap – apatite



**Рис. 6.** (а) Грейгит с пиритом в сидеритовом цементе гравелита (образец 3); (б) Пирротинные нодули в сидеритовой конкреции; (с) Пирротинные нодули в сидеритовом цементе гравелита (образец 3); (д) Пирротин в микротрещинах обломочного кварца оолитового железняка (образец 31); (е) Случайно ориентированные мелкие игольчатые пирротинные пластинки в гравелите (образец 3). Снимки в обратно рассеянных (а–д) и вторичных (е) электронах. G – грейгит, Po – пирротин, Pyr – пирит, Sid – сидерит, Q – кварц, Gl – глауконит, Cham – шамозитовый цемент

**Fig. 6.** (a) Greigite with pyrite framboid in siderite matrix of gritstone (sample 3); (b) Pyrrhotite nodules in siderite matrix of gritstone (sample 3); (c) Pyrrhotite nodules in siderite matrix of gritstone (sample 3); (d) Pyrrhotite in micro-cracks in detrital quartz (sample 31); (e) Randomly oriented fine acicular pyrrhotite laths in gritstone (sample 3). Backscattered (a–d) and secondary (e) electron micrographs. G – greigite, Po – pyrrhotite, Pyr – pyrite, Sid – siderite, Q – quartz, Gl – glauconite, Cham – chamosite matrix





**Рис. 8.** Хемостратиграфический вертикальный профиль факторов обогащения и соответствующих элементов (черная линия) палеоцен-эоценовых отложений Бакчарского месторождения (условные обозначения см. на рис. 2)

**Fig 8.** Chemostratigraphic profiles of enrichment factors and Al for Paleocene-Eocene sediments of Bakchar deposit (see legend in Fig. 2)

палеоцена и эоцена в гравелитах с сидеритовым цементом и ферромагнитными сульфидами железа. Концентрации биогенного бария достигают 660 ppm при среднем колебании 18,4...182,3 ppm.

Факторы обогащения индексов палеопродуктивности Zn и P, как правило, высокие, при максимальных значениях в верхнем палеоцене (более 10). Пик цинка (19,5) соответствует сыпучим оолитовым железнякам с минимальной концентрацией биогенного бария. Фактор обогащения меди в изучаемом разрезе находится на низком уровне (менее 1). Период максимального обогащения индикаторов палеопродуктивности соответствует палеоцен-эоценовой границе с содержанием  $Ba_{bio}$  (660 ppm) и P EF (30,9).

Фактор обогащения титана имеет низкие значения (<1) в верхнепалеоценовых породах.

#### Обсуждение результатов

Тесная ассоциация пирротина и грейгита с сидеритом (рис. 6) свидетельствует об активности диоксида углерода и сульфат-редукции в обстановке их формирования [1, 9]. Эти процессы сопровождались консорциумом сульфатредуцирующих бактерий и метанотрофных архей [49] в морском осадке. В этих условиях высвобождался сульфид, вступающий в реакцию с растворенным железом или железосодержащими минералами, что приводило к формированию сульфидных минералов [39, 50].

Согласно модели Бернера [2], пирротин и грейгит представляют собой промежуточные сульфидные стадии в процессе формирования пирита. Прерывание процесса пиритизации способствует сохранности пирротина и грейгита в морских отложениях, что может быть вызвано ускорением темпа осадконакопления и изоляцией осадка от доступа нисходящего потока вод, насыщенных сульфатом [7, 8]. В изучаемом разрезе ускоренное накопление

эоценовых морских глин могло ограничить доступ сульфид-иона для нижележащих толщ оолитовых железняков.

Сидеритовый цемент оолитовых железняков, которые состоят из минералов, формирующихся в условиях доступа кислорода (гетит, гидрогетит), является контрастным признаком смены кислородных условий среды на бескислородные (метановые), так как известно, что сидерит в изобилии формируется в метановой не-сульфидной обстановке [51]. Смена кислородной обстановки на бескислородную может быть вызвана бактериальным разложением органического вещества с потреблением кислорода, что в итоге приводит к образованию растворенного метана. При этом сформировавшийся в кислородных условиях гетит (в виде оолитов и ооидов) остаётся стабильным в метановой среде [51].

Судя по постепенному преобладанию сидерита в палеоценовых оолитовых железняках, метан диффундировал вверх разреза по пористому пространству породы, вступая в реакцию с находящимся в осадке реакционноспособным железом. Этот процесс приводил к формированию сидеритового цемента. Вероятно, что какая-то часть верхдиффундирующего метана могла выбрасываться в атмосферу. Выбросы метана могли вызывать подводные оползни морского дна [21], что отразилось в накоплении толщ гравелитов с сидеритовым цементом и пирротинном на границе палеоцена и эоцена древнего Западно-Сибирского моря.

Пирротин формировался как в сидеритовом цементе (рис. 6, c, d), так и в сидеритовых нодулях (рис. 6, b) в периоды ограниченной сульфат-редукции. Флюид, насыщенный диоксидом углерода и сульфат ионом, проникал в межзерновое пространство и микротрещины терригенного материала, что отразилось в формировании пирротина и сидерита

внутри зёрен обломочных минералов (рис. 6, *d*). Обильному образованию пирротина, грейгита и отчасти пирита в палеоценовых оолитовых железняках и эоценовых гравелитах способствовали три основных фактора: диффузия метана к границе вода–осадок, его анаэробное окисление и ограниченная активность сульфатредуцирующих бактерий. Обильные количества пирротина и грейгита в морских осадочных породах описано в других областях вблизи концентраций метана около вкрапленных газовых гидратов [4, 7, 8, 11, 38]. Формирование сфалерита в толще оолитовых железняков может быть связано с локальной деятельностью сульфатредуцирующих бактерий, производящих сульфид-ион, который вступал в реакцию с имеющимся в осадке цинком [42, 52] в шамозитовом цементе, в то время как все реакционное способное железо активно взаимодействовало с диоксидом углерода при построении сидеритового цемента.

Отсутствие ферромагнитных сульфидов железа в выше- и нижележащих отложениях объясняется завершенностью процесса пиритизации (рис. 5) в суб-кислородных диагенетических условиях за счет высокой активности сульфатредуцирующих бактерий [2, 53]. В маастрихтских оолитовых железняках за счет ограниченного количества разлагающегося органического материала [54] и, как следствие, относительно низкой доли метана, сидерит формировался в виде мелких агрегатов (рис. 7, *c*) совместно со сфалеритом и апатитом в шамозитовом цементе.

Формирование пирротина и грейгита в оолитовых железняках и гравелитах Бакчарского месторождения приводит к высокой намагниченности этих пород. Породы, содержащие ферромагнитные сульфиды железа, распознаются в изучаемом разрезе по значениям магнитной восприимчивости (рис. 2) выше  $80 \cdot 10^{-5}$  СИ ( $140,5 \dots 232,8 \cdot 10^{-5}$  СИ, в среднем). Эти результаты доказывают эффективность использования методов скважинного магнитного каротажа для литологической дифференциации подобных разрезов.

Специфическая диагенетическая обстановка палеоцен-эоценового разреза Бакчарского месторождения отражается в геохимических особенностях среды. Обогащение Mo, U, V на фоне слабого обогащения Cu в палеоценовых оолитовых железняках (рис. 8) свидетельствует о сульфидной аноксической постосадочной обстановке с отсутствием органического материала [41, 42, 47]. Отсутствие пирита и преобладание сидеритового цемента могло обеспечиваться диффундирующими вверх флюидами метана. Локальная сульфидизация проявлена в подошве оолитовых железняков с шамозит-сидеритовым цементом выражена формированием сфалерита. Предполагается, что цинк, адсорбированный из морской воды на железо-марганцевых гидроокислах, высвобождался в аноксической среде [42]. В дальнейшем этот цинк захватывался ограниченным количеством сульфида с образованием сфалерита [52]. На границе палеоцена и эоце-

на под действием выбросов метана и резко возрастающей палеопродуктивности создавалась аноксическая обстановка с ограниченной сульфат-активностью. Сульфидная аноксия продлилась сравнительно недолгое время, после чего в застойном морском режиме накопленный пелитовый материал способствовал изоляции осадка от диффундирующего вниз сульфидного флюида. Свидетельством сульфидной аноксии является обогащение отложений палеоредокс индексами Mo, U, V и палеопродуктивными индексами  $Va_{bio}$  и P [41, 42, 47], а также наличие в гравелитах и кровле железняков пирротина, грейгита, пирита. В сульфат-метановой транзитной зоне на границе вода–осадок происходило образование ферромагнитных сульфидов железа и отчасти пирита с захватом Mo, U, V.

Одними из важнейших процессов, сформировавших минералого-геохимический облик палеоцен-эоценовых отложений древнего эпиконтинентального Западно-Сибирского моря, являются образование и последующее окисление метана в совокупности с сульфатредукцией. Основными факторами, влияющими на активность этих процессов, являются: количество органического материала (или биопродуктивность древнего бассейна), доступ кислорода, состав поровых вод, проницаемость и пористость осадка, а также скорость осадконакопления. Формирование пирротина и грейгита в изучаемом разрезе происходило в специфической обстановке, связанной с диффундирующим вверх флюидом, содержащим метан, и ограниченным количеством сульфид-иона. Вероятные выбросы метана в пределах древнего Западно-Сибирского моря могли быть сопряжены во времени с катастрофическими выбросами метана в других областях, которые послужили одной из причин наступления глобального потепления, называемого палеоцен-эоценовым термальным максимумом [25, 26]. Наличие ферромагнитных сульфидов железа в отложениях Бакчарского месторождения, как продукта деятельности метаногенерирующих процессов, может служить предпосылкой для обнаружения газовых залежей в палеоцен-эоценовых толщах Западной Сибири. Формирование этих редких для осадочных пород минералов отражается в их геохимической специфике и повышенной намагниченности. Повышенная магнитная восприимчивость, в свою очередь, может служить важным инструментом для поисков подобных обстановок на других геологических разрезах.

#### Выводы

Комплексные исследования литологии, минералогии, магнитной восприимчивости и геохимии палеоцен-эоценовых отложений Бакчарского месторождения позволили получить следующие основные выводы.

1. На границе палеоцен-эоцена среди оолитовых железняков и гравелитов с сидеритовым цементом формировалось обильное количество пирротина и грейгита. Образование ферромагнит-

- ных сульфидов происходило в специфической геохимической обстановке (сульфат-метановой транзитной зоне), связанной с диффундирующим вверх флюидом метана и ограниченным количеством сульфид-иона. Эта обстановка характеризуется обогащением (более 10) палеоредокс индексами (Mo, U, V) и палеопродуктивными индексами ( $Va_{bio}$  и P).
2. Породы, содержащие пирротин и грейгит, обладают высокой магнитной восприимчивостью (выше  $80 \cdot 10^{-5}$  СИ) относительно палеоцен-эоценового разреза (в среднем  $27 \dots 66 \cdot 10^{-5}$  СИ). Магнитная восприимчивость пород может служить важным инструментом для поисков методами скважинного магнитного каротажа древних сульфат-метановых транзитных зон на других геологических разрезах, как признак потенциальной газоносности осадочного бассейна.
  3. Наличие пирротина и грейгита в породах Бакчарского месторождения, как результат деятельности метаногенирующих процессов, может служить предпосылкой для обнаружения газовых залежей в палеоцен-эоценовых толщах Западной Сибири.
  4. Выбросы метана в пределах древнего Западно-Сибирского моря могли провоцировать подводные оползневые процессы и оказывать непосредственное влияние на глобальное изменение климата на границе палеоцена и эоцена.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта 16-45-700090. Авторы благодарны сотрудникам кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Н.В. Гусевой, А.А. Хвацевской, И.С. Мазуровой за проведение метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roberts A.P., Turner G.M. Diagenetic formation of ferrimagnetic iron sulphide minerals in rapidly deposited marine sediments, South Island, New Zealand // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1993. – V. 115 (1) – P. 257–273.
2. Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: an update // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – V. 48 (4). – P. 605–615.
3. Roberts A.P. et al. Magnetic properties of sedimentary greigite ( $Fe_3S_4$ ): an update // *Reviews of Geophysics*. – 2011. – V. 49 (1). – P. RG1002.
4. Kars M., Kodama K. Rock magnetic characterization of ferrimagnetic iron sulfides in gas hydrate-bearing marine sediments at Site C0008, Nankai Trough, Pacific Ocean, off-coast Japan // *Earth, Planets and Space*. – 2011. – V. 67. – P. 1–12.
5. Horng C.-S., Chen K.-H. Complicated magnetic mineral assemblages in marine sediments offshore of southwestern Taiwan: Possible influence of methane flux on the early diagenetic process // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. – 2006. – V. 17 (4). – P. 1009–1026.
6. Weaver R., Roberts A.P., Barker A.J. A late diagenetic (syn-folding) magnetization carried by pyrrhotite: implications for paleomagnetic studies from magnetic iron sulphide-bearing sediments // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2002. – V. 200 (3). – P. 371–386.
7. Jørgensen B.B. et al. Anaerobic methane oxidation and a deep  $H_2S$  sink generate isotopically heavy sulfides in Black Sea sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2004. – V. 68 (9). – P. 2095–2118.
8. Neretin L.N. et al. Pyritization processes and greigite formation in the advancing sulfidation front in the upper Pleistocene sediments of the Black Sea // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2004. – V. 68 (9). – P. 2081–2093.
9. Larrasoana J.C. et al. Diagenetic formation of greigite and pyrrhotite in gas hydrate marine sedimentary systems // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2007. – V. 261 (3). – P. 350–366.
10. Chang L. et al. Identification and environmental interpretation of diagenetic and biogenic greigite in sediments: A lesson from the Messinian Black Sea // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2014. – V. 15 (9). – P. 3612–3627.
11. Kars M., Kodama K. Authigenesis of magnetic minerals in gas hydrate-bearing sediments in the Nankai Trough, offshore Japan // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2015. – V. 16 (3). – P. 947–961.
12. Horng C.-S., Huh C.-A. Magnetic properties as tracers for source-to-sink dispersal of sediments: A case study in the Taiwan Strait // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2011. – V. 309 (1). – P. 141–152.
13. Horng C.-S., Roberts A.P. Authigenic or detrital origin of pyrrhotite in sediments?: Resolving a paleomagnetic conundrum // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2006. – V. 241 (3). – P. 750–762.
14. Horng C.S. et al. Pyrrhotite as a tracer for denudation of the Taiwan orogen // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2012. – V. 13 (8). – P. 1–12.
15. Dill H.G., Siegfanz G., Marchig V. Mineralogy and chemistry of metalliferous muds forming the topstratum of a massive sulfide-metalliferous sediment sequence from East Pacific rise 18°S: Its origin and implications concerning the formation of ochrous sediments in cyprus-type deposits // *Marine Georesources & Geotechnology*. Taylor & Francis Group. – 1994. – V. 12 (2). – P. 159–180.
16. Seewald J.S., Seyfried W.E., Thornton E.C. Organic-rich sediment alteration: an experimental and theoretical study at elevated temperatures and pressures // *Applied Geochemistry*. – 1990. – V. 5 (1–2). – P. 193–209.
17. Lee C.H., Jin J.-H. Authigenic greigite in mud from the continental shelf of the Yellow Sea, off the southwest Korean Peninsula // *Marine Geology*. – 1995. – V. 128 (1). – P. 11–15.
18. Liu J. et al. High-resolution analysis of early diagenetic effects on magnetic minerals in post-middle-Holocene continental shelf sediments from the Korea Strait // *Journal of Geophysical Research*. – 2004. – V. 109 (B3). – P. B03103.
19. Kasten S. et al. Simultaneous formation of iron-rich layers at different redox boundaries in sediments of the Amazon deep-sea fan // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1998. – V. 62 (13). – P. 2253–2264.
20. Housen B.A., Musgrave R.J. Rock-magnetic signature of gas hydrates in accretionary prism sediments // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1996. – V. 139 (3–4). – P. 509–519.
21. Kvenvolden K.A. Gas hydrates – geological perspective and global change // *Reviews of Geophysics*. – 1993. – V. 31. – P. 173–187.
22. Tesi T. et al. Massive remobilization of permafrost carbon during post-glacial warming // *Nature Communications*. Nature Publishing Group. – 2016. – V. 7 (13653). – P. 1–10.
23. Zachos J.C. et al. A Transient Rise in Tropical Sea Surface Temperature During the Paleocene-Eocene Thermal Maximum // *Science*. – 2003. – V. 302 (5650). – P. 1551–1554.
24. Bowen G.J. et al. A humid climate state during the Palaeocene/Eocene thermal maximum // *Nature*. Nature Publishing Group. – 2004. – V. 432 (7016). – P. 495–499.



25. Carozza D.A., Mysak L.A., Schmidt G.A. Methane and environmental change during the Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM): Modeling the PETM onset as a two-stage event // *Geophysical Research Letters*. – 2011. – V. 38 (5). – P. 1–5.
26. Yamamoto A., Yamanaka Y., Tajika E. Modeling of methane bubbles released from large sea-floor area: Condition required for methane emission to the atmosphere // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2009. – V. 284 (3–4). – P. 590–598.
27. Panchuk K., Ridgwell A., Kump L.R. Sedimentary response to Paleocene-Eocene thermal maximum carbon release: A model-data comparison // *Geology*. – 2008. – V. 36 (4). – P. 315–318.
28. Западно-Сибирский железорудный бассейн / под ред. Ф.Н. Шахова. – Новосибирск: СО РАН СССР, 1964. – 448 с.
29. Podobina V. Regional stratigraphy and its dependency on tectonic movements (case study: Upper Cretaceous and Paleogene stages in Western Siberia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24 (1). – P. 1–6.
30. Podobina V.M. Paleocene biota of the West Siberian Plain // *Special Paper 369: Causes and consequences of globally warm climates in the early Paleogene*. Geological Society of America. – 2003. – V. 369. – P. 181–204.
31. Global Paleogeography. URL: <http://www2.nau.edu/rcb7/globaltext2.html> (дата обращения 26.03.2017).
32. Smith A.G., Smith D.G., Funnell B.M. Atlas of Mesozoic and Cenozoic coastlines. – Cambridge: Cambridge University Press, 1994. – 99 p.
33. Rudmin M.A., Mazurov A.K. Oolitic ores in the Bakchar iron-ore cluster (Tomsk Oblast) // *Doklady Earth Sciences*. – 2016. – V. 471 (2). – P. 1238–1241.
34. Rudmin M., Mazurov A., Bolsunovskaya L. Mineral and Elemental Composition Features of «Loose» Oolitic Ores in Bakchar Iron Ore Cluster (Tomsk Oblast) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014 (12003). – V. 21. – P. 1–6.
35. Rudmin M., Mazurov A., Ruban A. Facies and sedimentation model of iron-ore sequence in Bakchar deposit // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24 (12028). – P. 1–6.
36. Бакшт Ф.Б., Пшеничкин А.Я. Каппаметрические исследования пород и руд Бакчарского месторождения // *Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы и предприятия ТЭК Сибири: Материалы межрегиональной научно-практической конференции и круглых столов*. – Томск: ЦНТИ, 2009. – С. 160–167.
37. Рудмин М.А. Фациальные особенности и магнитная восприимчивость рудовмещающих отложений Бакчарского железорудного проявления (Томская область) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 48–55.
38. Roberts A.P. et al. Complex polarity pattern at the former Plio-Pleistocene global stratotype section at Vrica (Italy): Remagnetization by magnetic iron sulphides // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2010. – V. 292 (1). – P. 98–111.
39. Roberts A.P., Weaver R. Multiple mechanisms of remagnetization involving sedimentary greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>) // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2005. – V. 231 (3). – P. 263–277.
40. El-Habaak G. et al. The economic potential of El-Gedida glauconite deposits, El-Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt // *Journal of African Earth Sciences*. – 2016. – V. 120. – P. 186–197.
41. Brumsack H.-J. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2006. – V. 232 (2). – P. 344–361.
42. Tribouillard N. et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update // *Chemical Geology*. – 2006. – V. 232 (1). – P. 12–32.
43. Calvert S., Pedersen T. Geochemistry of Recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record // *Marine Geology*. – 1993. – V. 113 (1–2). – P. 67–88.
44. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks // *The Continental Crust: its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*. – Oxford: Blackwell, 1985. – 312 p.
45. Dymond J., Suess E., Lyle M. Barium in Deep-Sea Sediment: a Geochemical Proxy for Paleoproductivity // *Paleoceanography*. – 1992. – V. 7 (2). – P. 163–181.
46. Reitz A. et al. Biogenic barium and the detrital Ba/Al ratio: a comparison of their direct and indirect determination // *Marine Geology*. – 2004. – V. 204 (3). – P. 289–300.
47. Lebedel V. et al. Geochemical and palaeoecological record of the Cenomanian-Turonian Anoxic Event in the carbonate platform of the Preafrican Trough, Morocco // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2013. – V. 369. – P. 79–98.
48. Algeo T.J., Tribouillard N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum–uranium covariation // *Chemical Geology*. – 2009. – V. 268 (3). – P. 211–225.
49. Boetius A. et al. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane // *Nature*. Nature Publishing Group. – 2000. – V. 407 (6804). – P. 623–626.
50. Riedinger N. et al. Diagenetic Alteration of Magnetic Signals by Anaerobic Oxidation of Methane Related to a Change in Sedimentation Rate // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2005. – V. 69 (16). – P. 4117–4126.
51. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments // *Journal of Sedimentary Research*. – 1981. – V. 51 (2). – P. 359–365.
52. Labrenz M. et al. Formation of Sphalerite (ZnS) Deposits in Natural Biofilms of Sulfate-Reducing Bacteria // *Science*. – 2000. – V. 290 (5497). – P. 1744–1747.
53. Wei H. et al. Episodic euxinia in the Changhsingian (late Permian) of South China: Evidence from framboidal pyrite and geochemical data // *Sedimentary Geology*. – 2015. – V. 319. – P. 78–97.
54. Köhler I. et al. Biological carbon precursor to diagenetic siderite with spherical structures in iron formations // *Nature Communications*. – 2013. – V. 4. – P. 1–7.

Поступила 28.03.2017 г.

#### Информация об авторах

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мазуров А.К.**, доктор геолого-минералогических наук, первый проректор, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Рубан А.С.**, аспирант, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Усольцев Д.Г.**, аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 549.324:549.326:550.84:552.56

## CONDITIONS OF FORMATION OF PYRRHOTITE AND GREIGITE IN SEDIMENTS OF BAKCHAR DEPOSIT, WESTERN SIBERIA

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

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

**Aleksey S. Ruban**<sup>1</sup>,  
ruban@tpu.ru

**Dmitriy G. Usoltsev**<sup>1</sup>,  
usoltsev\_d@mail.ru

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

Recently the formation of pyrrhotite and greigite is more often linked with sulfate-methane transit zones of modern sediments. The paper considers methane generations as one of the possible ways of forming ferromagnetic iron sulfides in sedimentary rocks of Bakchar deposit.

**The main aim** of the study is to reconstruct the environmental conditions for formation of ferromagnetic sulphides in rocks of the Bakchar deposit for disclosure processes, which occurred in sediments of the ancient epicontinental West Siberian Sea at the Paleocene-Eocene boundary and also for interpretation of the high magnetization of these rocks.

**The methods used in the work:** mineralogical (scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis), geophysical (kappametry) and geochemical (X-Ray analysis, ICP-MS) studies of sediments (samples from core) which contain pyrrhotite and greigite to reconstruct the evolution of specific postdepositional processes within the shelf of ancient West-Siberian Sea at Paleocene-Eocene boundary.

As a result of the investigation the authors advance the theory of ferromagnetic iron sulfides formation in Bakchar deposit sediments with the upward diffusing methane and limited amount of sulfide ion. This environment was enriched with paleoredox proxies (Mo, U, V) and paleoproductivity proxies ( $Ba_{in}$  and P). Sedimentary rocks containing pyrrhotite and greigite are characterized by high values of magnetic susceptibility (more than  $80 \cdot 10^{-5}$  SI) that is a useful property to identify analogical rocks in drill cores. Presence of ferromagnetic iron sulfides within sedimentary rocks might be used to detect ancient gas hydrate systems in the Paleocene-Eocene sequences of Western Siberia. Methane emissions within the ancient West Siberian Sea might probably triggering large submarine landslides and affecting the global climate change at the Paleocene-Eocene boundary.

### Key words:

Pyrrhotite, greigite, iron sulfide, siderite, diagenesis, sulphate reduction, methane, magnetic susceptibility, Paleocene, Eocene, depositional conditions, Bakchar deposit, West Siberia.

The study was supported by the Russian Foundation of Basic Research and Tomsk Region Administration within the framework of the research project 16–45–700090. The authors appreciate N. Guseva, A. Khvashchevskaya and I. Mazurova (Department of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeoeology, Tomsk Polytechnic University) for geochemical analyses.

### REFERENCES

1. Roberts A.P., Turner G.M. Diagenetic formation of ferrimagnetic iron sulphide minerals in rapidly deposited marine sediments, South Island, New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, vol. 115 (1), pp. 257–273.
2. Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48 (4), pp. 605–615.
3. Roberts A.P. Magnetic properties of sedimentary greigite ( $Fe_3S_4$ ): an update. *Reviews of Geophysics*, 2011, vol. 49 (1), pp. RG1002.
4. Kars M., Kodama K. Rock magnetic characterization of ferrimagnetic iron sulfides in gas hydrate-bearing marine sediments at Site C0008, Nankai Trough, Pacific Ocean, off-coast Japan. *Earth, Planets and Space*, 2011, vol. 67, pp. 1–12.
5. Horng C.-S., Chen K.-H. Complicated magnetic mineral assemblages in marine sediments offshore of southwestern Taiwan: Possible influence of methane flux on the early diagenetic process. *Terrrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006, vol. 17 (4), pp. 1009–1026.
6. Weaver R., Roberts A.P., Barker A.J. A late diagenetic (syn-folding) magnetization carried by pyrrhotite: implications for paleomagnetic studies from magnetic iron sulphide-bearing sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, vol. 200 (3), pp. 371–386.
7. Jørgensen B.B. Anaerobic methane oxidation and a deep  $H_2S$  sink generate isotopically heavy sulfides in Black Sea sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, vol. 68 (9), pp. 2095–2118.
8. Neretin L.N. Pyritization processes and greigite formation in the advancing sulfidization front in the upper Pleistocene sediments of the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, vol. 68 (9), pp. 2081–2093.
9. Larrasoana J.C. Diagenetic formation of greigite and pyrrhotite in gas hydrate marine sedimentary systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, vol. 261 (3), pp. 350–366.
10. Chang L. Identification and environmental interpretation of diagenetic and biogenic greigite in sediments: A lesson from the Messinian Black Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, vol. 15 (9), pp. 3612–3627.

11. Kars M., Kodama K. Authigenesis of magnetic minerals in gas hydrate-bearing sediments in the Nankai Trough, offshore Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, vol. 16 (3), pp. 947–961.
12. Horng C.-S., Huh C.-A. Magnetic properties as tracers for source-to-sink dispersal of sediments: A case study in the Taiwan Strait. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, vol. 309 (1), pp. 141–152.
13. Horng C.-S., Roberts A.P. Authigenic or detrital origin of pyrrhotite in sediments?: Resolving a paleomagnetic conundrum. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, vol. 241 (3), pp. 750–762.
14. Horng C.S. Pyrrhotite as a tracer for denudation of the Taiwan orogen. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, vol. 13 (8), pp. 141–152.
15. Dill H.G., Siegfanz G., Marchig V. Mineralogy and chemistry of metalliferous muds forming the topstratum of a massive sulfide-metalliferous sediment sequence from East Pacific rise 18S: Its origin and implications concerning the formation of ochrous sediments in cyprus-type deposits. *Marine Georesources & Geotechnology*. Taylor & Francis Group, 1994, vol. 12 (2), pp. 159–180.
16. Seewald J.S., Seyfried W.E., Thornton E.C. Organic-rich sediment alteration: an experimental and theoretical study at elevated temperatures and pressures. *Applied Geochemistry*, 1990, vol. 5 (1–2), pp. 193–209.
17. Lee C.H., Jin J.-H. Authigenic greigite in mud from the continental shelf of the Yellow Sea, off the southwest Korean Peninsula. *Marine Geology*, 1995, vol. 128 (1), pp. 11–15.
18. Liu J. High-resolution analysis of early diagenetic effects on magnetic minerals in post-middle-Holocene continental shelf sediments from the Korea Strait. *Journal of Geophysical Research*, 2004, vol. 109 (B3), pp. B03103.
19. Kasten S. Simultaneous formation of iron-rich layers at different redox boundaries in sediments of the Amazon deep-sea fan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, vol. 62 (13), pp. 2253–2264.
20. Housen B.A., Musgrave R.J. Rock-magnetic signature of gas hydrates in accretionary prism sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, vol. 139 (3–4), pp. 509–519.
21. Kvenvolden K.A. Gas hydrates – geological perspective and global change. *Reviews of Geophysics*, 1993, vol. 31, pp. 173–187.
22. Tesi T. Massive remobilization of permafrost carbon during post-glacial warming. *Nature Communications*. Nature Publishing Group, 2016, vol. 7 (13653), pp. 1–10.
23. Zachos J.C. A Transient Rise in Tropical Sea Surface Temperature During the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Science*, 2003, vol. 302 (5650), pp. 1551–1554.
24. Bowen G.J. A humid climate state during the Palaeocene/Eocene thermal maximum. *Nature*. Nature Publishing Group, 2004, vol. 432 (7016), pp. 495–499.
25. Carozza D.A., Mysak L.A., Schmidt G.A. Methane and environmental change during the Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM): Modeling the PETM onset as a two-stage event. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38 (5), pp. 1–5.
26. Yamamoto A., Yamanaka Y., Tajika E. Modeling of methane bubbles released from large sea-floor area: Condition required for methane emission to the atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, vol. 284 (3–4), pp. 590–598.
27. Panchuk K., Ridgwell A., Kump L.R. Sedimentary response to Paleocene-Eocene thermal maximum carbon release: A model-data comparison. *Geology*, 2008, vol. 36 (4), pp. 315–318.
28. *Zapadno-Sibirskiy zhelezorudnyy basseyn* [West Siberian iron ore basin]. Ed. by F.N. Shakhova. Novosibirsk, SO RAN SSSR Publ., 1964. 448 p.
29. Podobina V. Regional stratigraphy and its dependency on tectonic movements (case study: Upper Cretaceous and Paleogene stages in Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24 (1), pp. 1–6.
30. Podobina V.M. Paleocene biota of the West Siberian Plain. *Special Paper 369: Causes and consequences of globally warm climates in the early Paleogene*. Geological Society of America, 2003, vol. 369, pp. 181–204.
31. Global Paleogeography. Available at: <http://www2.nau.edu/rcb7/globaltext2.html> (accessed 26 March 2017).
32. Smith A.G., Smith D.G., Funnell B.M. *Atlas of Mesozoic and Cenozoic coastlines*. Cambridge, Cambridge University Press, 1994. 99 pp.
33. Rudmin M.A., Mazurov A.K. Oolitic ores in the Bakchar iron-ore cluster (Tomsk Oblast). *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 471 (2), pp. 1238–1241.
34. Rudmin M., Mazurov A., Bolsunovskaya L. Mineral and Elemental Composition Features of «Loose» Oolitic Ores in Bakchar Iron Ore Cluster (Tomsk Oblast). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21 (12003), pp. 1–6.
35. Rudmin M., Mazurov A., Ruban A. Facies and sedimentation model of iron-ore sequence in Bakchar deposit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24 (12028), pp. 1–6.
36. Baksht F.B., Pshenichkin A.Ya. Kappametricheskie issledovaniya porod i rud Bakcharskogo mestorozhdeniya [Parametric studies of rocks and ores of the Bakchar deposit]. *Problemy i perspektivy razvitiya mineralno-syrevoy bazy i predpriyatiya TEK Sibiri. Materialy mezhregionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i kruglykh stolov* [Problems and prospects for the development of the mineral and raw materials base and enterprises of the fuel and energy complex of Siberia. Proc. of International scientific conference]. Tomsk, 2009. pp. 160–167.
37. Rudmin M.A. Facial features and magnetic susceptibility of ore-hosting sediments of Bakchar iron ore occurrence (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 48–55. In Rus.
38. Roberts A.P. Complex polarity pattern at the former Plio-Pleistocene global stratotype section at Vrica (Italy): Remagnetization by magnetic iron sulphides. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, vol. 292 (1), pp. 98–111.
39. Roberts A.P., Weaver R. Multiple mechanisms of remagnetization involving sedimentary greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>). *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 231 (3), pp. 263–277.
40. El-Habaak G. The economic potential of El-Gedida glauconite deposits, El-Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, vol. 120, pp. 186–197.
41. Brumsack H.-J. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, vol. 232 (2), pp. 344–361.
42. Tribouillard N. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 2006, vol. 232 (1), pp. 12–32.
43. Calvert S., Pedersen T. Geochemistry of Recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record. *Marine Geology*, 1993, vol. 113 (1–2), pp. 67–88.
44. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. *The Continental Crust: its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*. Oxford, Blackwell, 1985. 312 p.
45. Dymond J., Suess E., Lyle M. Barium in Deep-Sea Sediment: a Geochemical Proxy for Paleoproductivity. *Paleoceanography*, 1992, vol. 7 (2), pp. 163–181.
46. Reitz A. Biogenic barium and the detrital Ba/Al ratio: a comparison of their direct and indirect determination. *Marine Geology*, 2004, vol. 204 (3), pp. 289–300.
47. Lebedel V. Geochemical and palaeoecological record of the Cenomanian-Turonian Anoxic Event in the carbonate platform of the

- Preafrikan Trough, Morocco. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, vol. 369, pp. 79–98.
48. Algeo T.J., Tribovillard N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum–uranium covariation. *Chemical Geology*, 2009, vol. 268 (3), pp. 211–225.
49. Boetius A. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. *Nature. Nature Publishing Group*, 2000, vol. 407 (6804), pp. 623–626.
50. Riedinger N. Diagenetic Alteration of Magnetic Signals by Anaerobic Oxidation of Methane Related to a Change in Sedimentation Rate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, vol. 69 (16), pp. 4117–4126.
51. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments. *Journal of Sedimentary Research*, 1981, vol. 51 (2), pp. 359–365.
52. Labrenz M. Formation of Sphalerite (ZnS) Deposits in Natural Biofilms of Sulfate-Reducing Bacteria. *Science*, 2000, vol. 290 (5497), pp. 1744–1747.
53. Wei H. Episodic euxinia in the Changhsingian (late Permian) of South China: Evidence from framboidal pyrite and geochemical data. *Sedimentary Geology*, 2015, vol. 319, pp. 78–97.
54. Köhler I. Biological carbon precursor to diagenetic siderite with spherical structures in iron formations. *Nature Communications*, 2013, vol. 4, pp. 1–6.

*Received: 28 March 2017.*

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

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksey K. Mazurov**, Dr. Sc., first vice-rector, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksey S. Ruban**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitriy G. Usoltsev**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.461

## СИСТЕМА «ВОДА–ГРАНИТ»: ВРЕМЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ПРЕСНЫХ ВОД

Рыженко Борис Николаевич<sup>1</sup>,  
ryzhenko@geokhi.ru

Сидкина Евгения Сергеевна<sup>1</sup>,  
SidkinaES@yandex.ru

<sup>1</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Россия, 119991, ГСП-1, ул. Косыгина, 19.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки изменения химического состава вод в результате взаимодействия воды с горными породами. Следует рассматривать отдельно происхождение самой  $H_2O$  и растворенных в ней компонентов. В данном исследовании источником  $H_2O$  являются атмосферные осадки. Поскольку вода используется в тех или иных целях (хозяйственно-питьевое, техническое водоснабжение), она должна соответствовать установленным нормативам водопользования. Качество воды зависит от её свойств и химического состава. В свою очередь, химический состав полученной воды будет зависеть от состава породы, с которой она взаимодействует, времени воздействия, контакта с атмосферой.

**Цель работы:** определение времени формирования химического состава пресных вод (до 1 г/л) при взаимодействии атмосферной воды с гранитом и ионно-солевого состава полученной воды; оценка изменения гранита в результате его взаимодействия с водой.

**Методы исследования:** термодинамическое моделирование взаимодействия «вода–порода» с применением программного комплекса NCh (разработчик Ю.В. Шваров). Алгоритм программы основан на комбинированном использовании метода минимизации свободной энергии Гиббса системы и констант равновесия между компонентами системы.

**Результаты.** Показано, что в системе «вода–гранит» открытой по кислороду и углекислоте пресные воды формируются за период до 3000 тысяч лет. Химический состав полученной воды – гидрокарбонатно-натриевый. рН раствора в результате взаимодействия возрастает до 7,8. Eh снижается в от 0,79 до 0,62 В. Рост кальция в растворе ограничивается выпадением вторичных минералов: доломит и апатит.

### Ключевые слова:

Гранит, система «вода–порода», термодинамическое моделирование, изменения гранита, минерализация воды.

Раскрытие механизмов эволюции системы «вода–порода» является ключевым аспектом в понимании процессов формирования химического состава и качества природных вод и развития геотехнологий водопользования. Значительный вклад в решение этой проблемы внесли многие учёные, среди которых нельзя не отметить коллектив Сибирской гидрогеохимической школы и, особенно, её научного руководителя – С.Л. Шварцева. Именно С.Л. Шварцев первым обратил внимание на способность пород к реакции гидратации алюмосиликатных минералов, что приводит к «сгущению» подземных вод. В своей монографии «Гидрогеохимия зоны гипергенеза» (1998) С.Л. Шварцев [1] представил формирование последовательности минералов (рис. 1), которая соответствует снижению скорости водообмена (увеличению времени взаимодействия) в системе «вода – алюмосиликатные породы». Схема наглядно показывает непрерывность концентрирования химических элементов в растворе за счет растворения горных пород на определенном этапе эволюции системы, которая прерывается образованием новых минералов, концентрирующих определенную ассоциацию химических элементов. Одновременно возникла известная формулировка о равновесно-неравновесном состоянии системы «вода–порода» [1–4]. В настоящее время это направление успешно развивается в Томском политехническом университете [5–9].

Специалисты другой (московской) гидрогеохимической школы, к которой принадлежит один из докладчиков, равновесным компьютерным моделированием системы «вода–порода–газ» установили основные физико-химические факторы, определяющие состав образующегося водного раствора: (а) термодинамическая открытость–закрытость системы «вода–порода–газ» относительно  $CO_2$  и  $O_2$ ; (б) петрохимический тип пород, особенно формы нахождения летучих химических элементов в породах, (в) температура – давление существования системы [10, 11]. Эти исследования были возможны благодаря созданию эффективных программ расчета равновесного состояния системы «вода–порода–газ» [12, 13]. Показателем признания успехов российских специалистов в развитии этого нового научного направления является доклад С.Л. Шварцева на пленарном заседании 14 Международного Симпозиума «Water-Rock Interaction» (2013 г.) во Франции, посвященном 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского [14].

Следует отметить, что пионерами компьютерного моделирования геохимических процессов были сотрудники Института геохимии имени А.П. Виноградова (г. Иркутск) [15], в котором эти исследования проводились и в последующие годы [16, 17] так же, как и за рубежом [18, 19]. Стоит отметить программный комплекс NCh (разработчик Ю.В. Шваров, МГУ), основанный на методе мини-



мизации свободной энергии Гиббса. NCh позволяет выполнить моделирование взаимодействия системы «вода–порода» и таким образом спрогнозировать результирующий химический состав раствора, количественный состав равновесных ассоциаций твердых фаз при заданных условиях.

В зоне гипергенеза система «вода–порода–газ» открыта относительно атмосферных газов ( $O_2$  и  $CO_2$ ). Отражая интенсивность водообмена, величина отношения между массами взаимодействующих пород изменяется в значительных пределах (0,0001–0,1), что сказывается на химическом составе вод.

Две причины влияют на формирование минеральной ассоциации и состава вод: минеральный состав преобладающих пород земной коры и величины удельной скорости растворения этих минералов. Прямой учет скорости растворения минералов не предусмотрен при термодинамическом (равновесном) моделировании взаимодействия компонентов системы «вода–порода–газ». В большинстве работ по термодинамическому моделированию системы «вода–порода–газ» учитывают так называемую «степень протекания» реакции (со всей породой). Хотя надо бы учитывать «степень протекания» (скорость взаимодействия водного раствора) с *каждым* минералом породы. А при более тщательном подходе также стоит учитывать и скорости других реакций, протекающих в системе «вода–порода» (ионизация-комплексобразование, окисление-восстановление, сорбция-десорбция). Наиболее медленными в системе «вода–порода» являются процессы растворения твердых минералов, или сложные процессы, в которых растворение является одной из стадий. В условиях зоны гипергенеза в околонейтральных водах начальные скорости растворения минералов составляют величины порядка  $10^{-17}$ – $10^{-9}$  моль/(см<sup>2</sup>·с). В кислых и щелочных растворах и с ростом температуры скорости увеличиваются (рис. 2). Скорость растворения твердого вещества зависит от его природы, состава раствора, пропорциональна разности химических потенциалов компонентов системы в твердой фазе и растворе.

Нами предпринята попытка расширить возможности метода равновесного термодинамического моделирования [20] в следующей форме. Химический состав гранита (табл. 1) был пересчитан на минеральный: (а) как равновесный и (б) как соответствующий ассоциации минералов гранитов (выполнено Е.В. Шарковым). Как видно из табл. 1, содержание основных породообразующих минералов, рассчитанное по методике (а) и (б), практически совпадает.

Трудности возникают при оценке минераловоспителей летучих элементов и форм, в которых летучие элементы находятся в этих минералах. Например, в работе [21] для хлора принят NaCl в полевых шпатах (приблизительно поровну в форме газовой-жидких включений и атомов, находящихся в решетке). Для фтора известны минеральные фор-

мы: F-апатит, флюорит и слоистые силикаты. Для серы можно допустить минеральную форму  $FeS_2$ , для углерода – карбонатную.

Масса  $M_i$  каждого минерала ( $i$ ) в 100 кг породы пересчитана на объем  $V_i$ , который занимает этот минерал (число молей минерала  $i$  умножалось на мольный объем минерала  $i$ ). В виде формы минерала выбрана сфера, как простейший вариант. Из объема определена площадь поверхности  $S_i$  шара, занимающего объем  $V_i$ ;  $S_i = 2,418V_i^{2/3}$ . Необходимо обратить внимание, что площадь поверхности шара уменьшается в степени  $2/3$  принятого объема. Иными словами, если рассматривать порцию породы 100 г (в 1000 раз меньше), то сфера такой порции породы обладает в 100 раз меньшей поверхностью.

Для каждого минерала в литературе выбрана экспериментальная удельная скорость растворения при нейтральной величине pH (табл. 2) [22–24].



Рис. 1. Схема соотношения химических элементов, накапливаемых в растворе и концентрируемых твердой фазой. А–Н – точки, отражающие начало образования вторичной фазы и перехода системы в иное стационарное состояние [1]

Fig. 1. Scheme of ratio of chemical elements accumulated in aqueous solution and in solids. A–H are the points corresponding to formation of the secondary minerals and the system transition into the following stationary state

Зависимость скорости растворения  $r$  минеральных фаз от pH и состава раствора в настоящее время принято описывать эмпирическим уравнением вида [23]:

$$r = k_1 \cdot a_{H^+}^n + k_2 \cdot a_{H_2O}^n + k_3 \cdot a_{OH^-}^n + k_4 \cdot a_L^n,$$

где  $k, n$  – эмпирические константы, определяемые аппроксимацией экспериментальных данных при заданной температуре и составе водного раствора (pH, концентрации растворенных частиц  $i$ ). Зависимости скорости растворения многих минералов от pH и температуры посвящена обзорная работа В.А. Алексеева [24] и его последующие публикации (рис. 2).

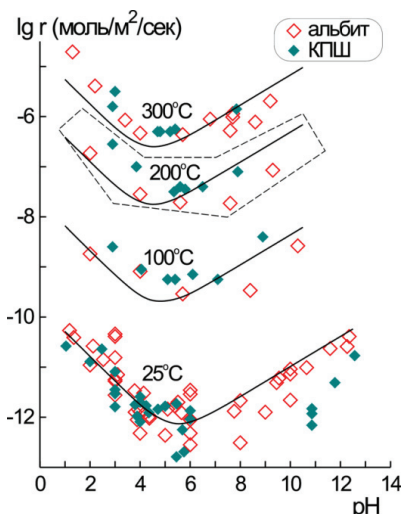


Рис. 2. Скорость растворения полевых шпатов как функция температуры и pH

Fig. 2. Solubility rate of feldspar versus pH at 25, 100, 200, 300 °C

Умножением удельной скорости растворения каждого минерала в каждой породе на площадь его поверхности была установлена масса вещества, которое отступает в водную фазу системы «вода–порода» от каждого минерала за единицу времени. Полученные характеристики включены в файл баланса масс, который используется далее для определения равновесного состава системы «гранит–вода».

Таблица 1. Химический [10] и минеральный состав гранита, принятый при моделировании (моли/100 кг породы): а) расчет по термодинамическому равновесию; б) расчет с учетом минеральной ассоциации гранитных пород (Е.В. Шарков)

Table 1. Chemical [10] and assumed mineral compositions (mole/100 kg of rock): a) computer simulation, b) mineralogical study (E.V. Sharkov)

Компоненты Components	Масс. % (wt. %)	Минералы Minerals	a/a	б/б
SiO <sub>2</sub>	71,57	SiO <sub>2</sub> (Кварц/Quartz)	548,0	524,3
TiO <sub>2</sub>	0,35	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (КПШ/Potassium feldspar)	90,24	90,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,75	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (Альбит/Albite)	100,6	101,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,76	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (Анортит/Anorthite)	30,98	31,1
FeO	1,50	MgSiO <sub>3</sub> (Пироксен/Pyroxene)	–	24,0
MnO	0,70	FeSiO <sub>3</sub> (Пироксен/Pyroxene)	–	12,8
MgO	0,96	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (Магнетит/Magnetite)	3,17	4,85
CaO	1,89	MgSiO <sub>4</sub> (Форстерит/Fortsterite)	8,23	–
Na <sub>2</sub> O	3,12	FeTiO <sub>3</sub> (Сфен/Sphene)	–	4,50
K <sub>2</sub> O	4,25	TiO <sub>2</sub> (Рутил/Rutile)	4,38	–
H <sub>2</sub> O	0,73	Ca (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH,F,Cl) (Апатит/Apatite)	0,54	0,54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	FeS <sub>2</sub> (Пирит/Pyrite)	0,20	0,20
F	0,08	CaF <sub>2</sub> (Флюорит/Fluorite)	2,05	2,05
Cl	0,024	NaCl (Галит/Halite)	0,68	0,68
S	0,04	–	–	–
C	0,03	–	–	–

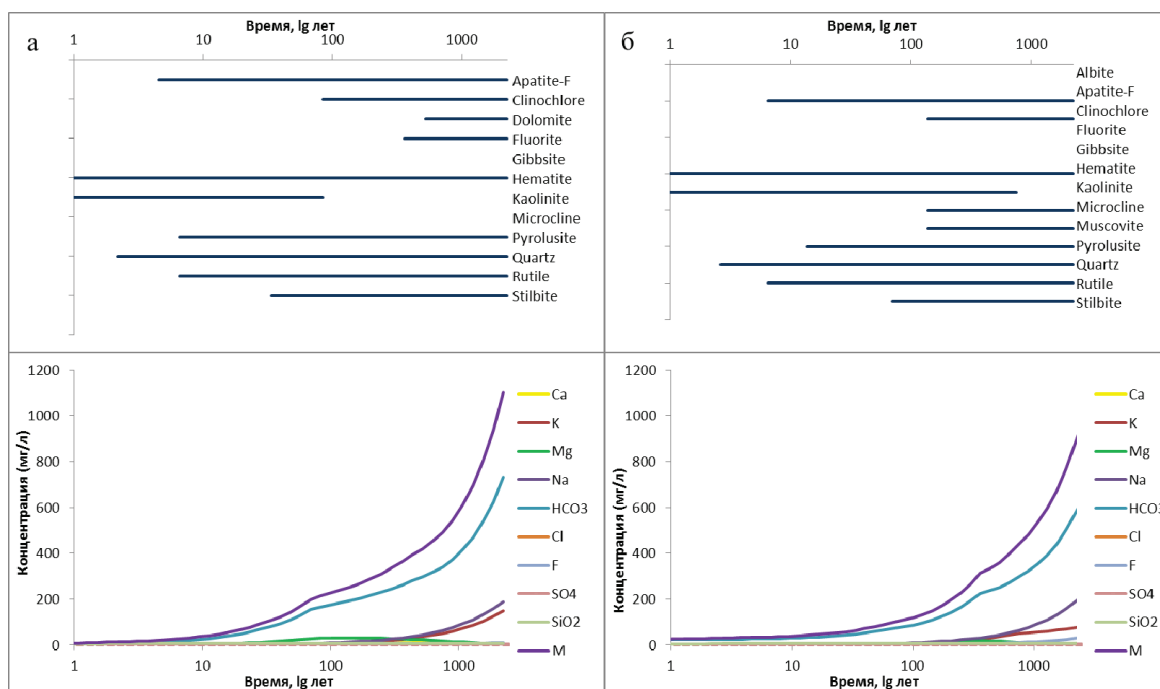


Рис. 3. Минеральные ассоциации и состав водной фазы, полученный при моделировании взаимодействия системы «вода–гранит»: а) расчет по термодинамическому равновесию; б) расчет с учетом минеральной ассоциации гранитных пород

Fig. 3. Mineral associations and aqueous phase composition resulting from computer simulation of «water–granite» system: a) computer simulation, б) mineralogical study (Sharkov E.V.)

**Таблица 2.** Скорости растворения минералов

**Table 2.** Minerals dissolution rates

Минерал Mineral	Формула минерала Formula	$lgr$ , экв/(см <sup>2</sup> ·с)	pH	Наклон в кислой области pH Slope in the acidic pH range	Наклон в щелочной области pH Slope in the alkaline pH range
Гипс/Gypsum	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	-6,0	3-10	-	-
Кальцит/Calcite	CaCO <sub>3</sub>	-9,6	6-10	-	-
Доломит/Dolomite	CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-12,6	6-10	-	-
Апатит/Apatite	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH,Cl	-13,0	-	0,7	-
Лейцит/Leusite	K[AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	-13,2	-	-	0,2
Al-пироксен/Al-pxroxene	K,LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> -(Na,Ca,Fe)AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	-13,3	5-7	0,5-0,7	0,2
Волластонит/Wollastonite	(Ca,Mg) <sub>2</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	-13,3	7-9	0,6	-
Нефелин/Nepheline	(Na,K)[AlSiO <sub>4</sub> ]	-13,4	5-7	1,0	0,1
Роговая обманка/Hornblende	(Na,Ca,Mg,Al)[Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> ](OH) <sub>2</sub>	-14,2	5-10	0,6	-
Диопсид/Diopside	(Ca,Mg,Fe,Al) <sub>2</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	-14,3	6	0,7	-
Глаукофан/Glaucophane	(Na,Ca,Mg,Fe,Al)[Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> ](OH) <sub>2</sub>	-14,5	7	0,7	-
Тремолит/Tremolite	(Ca,Mg,Fe)[Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> ](OH) <sub>2</sub>	-14,6	3-9	0,7	-
Гранат/Garnet	(Ca,Mg,Fe,Al) <sub>3</sub> [SiO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub>	-15,0	5-8	1,0	0,3
Кордиерит/Cordierite	Al <sub>3</sub> (Mg,Fe) <sub>2</sub> [AlSi <sub>5</sub> O <sub>18</sub> ]	-15,2	5-8	1,0	-
Энстатит/Enstatite	(Mg,Fe) <sub>2</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	-15,3	6-8	0,7	0,4
Гиббсит/Gibbsite	Al (OH) <sub>3</sub>	-15,5	3	1,0	-
Хлорит/Chlorite	(Mg,Fe) <sub>2</sub> Al [AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>8</sub>	-15,5	5	0,7	-
Дистен/Disthene	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	-15,6	5-7	1,0	-
Анортит и кварц/Anorthite and quartz	Ca [Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ] и SiO <sub>2</sub>	-15,6	5-9	1,0	0,4
Бронзит/Bronzite	(Mg,Fe) <sub>2</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	-15,7	6	0,5	-
Альбит/Albite	Na[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]-K [AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	-15,8	5-8	0,5	0,4
Эпидот/Epidote	(Ca,Fe,Al) <sub>3</sub> [Si <sub>3</sub> O <sub>11</sub> ] OH	-16,0	5-9	0,5	0,4
Ставролит/Staurolite	(Al,Fe) <sub>7</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>22</sub> ](OH) <sub>2</sub>	-16,2	5-6	1,0	0,4
Авгит/Augite	(Na,Mg,Fe,Al)[(Al,Si) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	-16,2	-	-	-
Биотит/Biotite	(K,Na)(Mg,Fe)[AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH,F) <sub>2</sub>	-16,3	6	0,8	-
Серпентин/Serpentine	Mg <sub>6</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>8</sub>	-16,4	7	-	-
Каолинит/Kaolinite	Al <sub>2</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ](OH) <sub>4</sub>	-16,5	6-7	0,7	-
Иллит/Illite	(K,Mg)Al[AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub>	-16,5	7	0,8	-
Обсидиан/Obsidian	SiO <sub>2</sub> и Mg <sub>6</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>8</sub>	-16,5	-	-	0,2
Оливин/Olivine	(Mg,Fe)[SiO <sub>4</sub> ]	-16,8	7	1,0	0,5
Мусковит/Muskovite	KAl <sub>2</sub> [AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub>	-17,2	7	1,0	0,5

Было рассмотрено равновесное состояние двух систем «вода–гранит», открытых по CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, с (а) и (б) стартовыми наборами минералов (табл. 1). На рис. 3 а, б показано изменение состава водной фазы и равновесной минеральной ассоциации при изменении времени взаимодействия воды и гранитной породы (при 25 °С).

При расчете (а) вода в конечной точке моделирования является гидрокарбонатной натриево-кальциевой с высоким содержанием фтора до 10 мг/л. Как известно, оптимальное содержание фтора в питьевой воде колеблется в пределах 0,7–1,2 мг/л (допустимо до 1,5 мг/л). В расчете (б) получена гидрокарбонатная натриевая вода с еще более высоким содержанием фтора. Причиной этому является отсутствие флюорита во вторичных минеральных фазах, соответственно фтор накапливается быстрее. Повышенное содержание фтора в питьевых водах является недопустимым, и такая вода должна обязательно проходить процедуру дефто-

рирования, поскольку употребление воды в питьевых целях ведет к заболеванию населения (кариес, флюороз, остеосклероз, нарушение функций щитовидной железы, сердечно-сосудистой системы, нарушение развития костей у детей).

В зависимости от исходного минерального состава есть различия в равновесных минеральных ассоциациях: вместо альбита и мусковита, типичных для гранитоидов, появляется доломит. Как отмечалось выше, существуют трудности определения форм существования летучих в горной породе.

В настоящей работе мы ограничились моделированием накопления химических элементов в водном растворе с pH=5–8, чтобы пренебречь увеличением скоростей взаимодействия минералов гранита при меньших и больших pH (рис. 2), но все-таки достигли верхней границы минерализации пресных вод.

Принципиальный шаг, учитывающий влияние pH на константы скорости, а также изменение пло-

щади минеральных фаз при реакции, реализован [25, 26] на примере выветривания гавайских базальтов. Очевидно, что такие алгоритмы сложны, но позволяют рассматривать кинетику взаимодействия вода–порода в более широких пределах составов.

#### Заключение

Выполнено моделирование в системе «вода–гранит», открытой по кислороду и углекисло-

те. Показано, что химический состав пресной воды (минерализация на последнем шаге моделирования 1 г/л) в изучаемой системе формируется за период до 3 тысяч лет. При этом полученная вода является гидрокарбонатной натриевой с высоким содержанием фтора. pH раствора в результате взаимодействия возрастает до 7,8. Eh снижается в от 0,79 до 0,62 В. Рост кальция в растворе ограничивается выпадением вторичных минералов: доломит (а) и апатит (б).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1988. – 366 с.
2. Shvartsev S.L. The internal evolution of the water-rock geological system // Herald of the Russian academy of sciences. – 2012. – № 2 (82). – P. 134–142.
3. Shvartsev S.L. Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone // Geochemistry international. – 2000. – № 13 (38). – P. 260–276.
4. Шварцев С.Л. Механизмы преобразования базальтов подземными водами в граниты // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы Второй Всероссийской научной конференции с международным участием. – Владивосток, 2015. – С. 53–59.
5. Domrocheva E., Lepokurova O. Ground water regimes containing country rock minerals in Southern Kuzbass (case study: Narysk-Ostashkin) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 15 April 2016. – V. 33. – Iss. – Article number 012003. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012003> (дата обращения: 15.08.2016).
6. Химический и микробиологический состав подземных вод децентрализованного водоснабжения южных и центральных районов Томской области / О.Е. Лепокурова, И.С. Иванова, С.Л. Шварцев, Ю.В. Колубаева, Н.Г. Наливайко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 29–41.
7. Timoshenkova A.N., Moraru C.Ye., Pasechnik Ye.Yu., Tokarenko O.G., Butoshina V.A. Ground and Intermediate Water Equilibrium with Water-Bearing Rock Minerals (Moldova) under Anthropogenic Impact // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 15 April 2016. – V. 33. – Iss. 1. – Article number 012025. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012025>. (дата обращения: 15.08.2016)
8. Гусева Н.В., Отакулова Ю.А. Геохимия подземных вод Пришкентского артезианского бассейна (Республика Узбекистан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 127–136.
9. Geochemistry and chemical evolution of saline lakes of western Mongolia / S.L. Shvartsev, M.N. Kolpakova, V.P. Isupov, A.G. Vladimirov, S. Ariunbileg // Geochemistry International. – 2014. – № 5 (52). – P. 388–403.
10. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦЕНТЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
11. Ryzhenko B.N., Cherkasova E.V. Chemical composition of natural waters and brines as a result of hydrogeochemical processes in water–rock–gas systems // Geochemistry international. – 2013. – № 13 (50). – P. 1101–1150.
12. Shvarov Yu.V. Algorithmization of the numeric equilibrium modeling of dynamic geochemical processes // Geochemistry international. – 1999. – № 6 (37). – P. 571–576.
13. Shvarov Yu.V. HCh: new potentialities for the thermodynamic simulation of geochemical systems offered by windows // Geochemistry international. – 2008. – № 8 (46). – P. 834–839.
14. Chudaev O., Shvartsev S., Ryzhenko B. VI Vernadsky and main research avenues in modern hydrogeochemistry // Procedia Earth and Planetary Science. – 2013. – V. 7 – P. 163–166.
15. Карпов И.К., Киселев А.И., Летников Ф.А. Химическая термодинамика в геохимии и петрологии. – Иркутск: Изд-во СО АН СССР, 1971. – 385 с.
16. Pavlov S.Kh., Chudnenko K.V. Modeling of the formation of thermal waters enriched in nitrogen gas // Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Water–Rock Interaction. – Guanajuato, Mexico, 2010. – P. 793–796.
17. Galimov E.M. Physicochemical computer simulation of hydrogeochemical and hydrothermal processes in Russia // Geochemistry international. – 2012. – № 13 (50). – P. 1045–1047.
18. Perez I.J., Heidemann R.A. SPCALC: A new multiphase geochemical speciation software // Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Water–Rock Interaction. – Guanajuato, Mexico, 2010. – P. 805–808.
19. Brusky I., Sembera J., Paces T. Modeling of long-term water rock interaction in the Bohemian Cretaceous Basin // Procedia Earth and Planetary Science. – 2013. – V. 7 – P. 782–785.
20. Борисов М.В., Шваров Ю.В. Термодинамика геохимических процессов. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 256 с.
21. Fuge R. Water soluble chlorine in granite rocks // Chem. Geology. – 1979. – V. 25. – № 1/2. – P. 169–174.
22. Svedrup H.U. The kinetic of base cation release due to chemical weathering. – Lund: Lund University Press, 1990. – 246 p.
23. Lasaga A.C. Chemical kinetics of water–rock interaction // J. Geophys. Res. – 1984. – V. 89. – № 6. – P. 4009–4023.
24. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: в 5 т. Т. 1: Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / под ред. С.Л. Шварцева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
25. Мироненко М.В., Золотов М.Ю. Равновесно-кинетическая модель взаимодействий вода–порода // Геохимия. – 2012. – № 1. – С. 3–9.
26. Мироненко М.В., Черкасова Е.В. Кинетико-термодинамическая модель формирования латеритной коры выветривания по гавайским базальтовым туфам. Верификация модели // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы Второй Всероссийской научной конференции с международным участием. – Владивосток, 2015. – С. 155–158.

Поступила 28.03.2017 г.



#### **Информация об авторах**

**Рыженко Б.Н.**, доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук.

**Сидкина Е.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук.

UDC 550.461

## «WATER–GRANITE» SYSTEM: TIME OF FORMATION OF FRESHWATER COMPOSITION

**Boris N. Ryzhenko**<sup>1</sup>,  
ryzhenko@geokhi.ru

**Evgeniya S. Sidkina**<sup>1</sup>,  
SidkinaES@yandex.ru

<sup>1</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences, 19, Kosygin street, Moscow, 119991, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to evaluate the changes in groundwater chemical composition due to water–rock interaction. Usually the source of water, the H<sub>2</sub>O molecules namely, and the source of dissolved components are considered separately. In the study the atmosphere precipitates is the source of H<sub>2</sub>O. As water is used for different purposes (potable water supply, industrial water supply), it must correspond to the specified water use standards. Water quality depends on its features and composition. Water chemical composition depends, on its turn, on the structure of rock at interaction, interaction time and contact with atmosphere.

**The main aim** of the study is to determine granite alteration and age of potable water chemical composition formation due to granite – meteoritic water interaction.

**Methods of research:** thermodynamic simulation of water–rock interaction using HCh code developed by Yu.V. Shvarov. The equilibrium state algorithm is based on Gibbs free energy minimization and on chemical reactions system solution.

**The results.** It is shown that in the «water–granite» system, open in respect to O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>, the Na–HCO<sub>3</sub> composition of potable water forms during 3000 years. The aqueous solution pH value, which resulted from water–rock interaction, increases up to 7,8 but aqueous solution Eh value decreases from 0,79 to 0,62 V. The aqueous calcium concentration is limited by secondary minerals formation and deposition: dolomite and apatite.

**Key words:**

Granite, «water–rock» system, thermodynamic simulation, granite alteration, water salinity.

**REFERENCES**

- Shvartsev S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 366 p.
- Shvartsev S.L. The internal evolution of the water–rock geological system. *Herald of the Russian academy of sciences*, 2012, vol. 82, no. 2, pp. 134–142. In Rus.
- Shvartsev S.L. Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone. *Geochemistry international*, 2000, vol. 38, no. 13, pp. 260–276. In Rus.
- Shvartsev S.L. Mechanisms for groundwater transformation of basalt in granite. *Proceedings of the Second Russian Scientific Conference with international participation*. Vladivostok, 2015. pp. 155–158.
- Domrocheva E., Lepokurova O. Ground water regimes containing country rock minerals in Southern Kuzbass (case study: Narysk-Ostashkin). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, Iss. 1, Article number 012003. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012003> (accessed 15 August 2016).
- Lepokurova O., Ivanova I., Shvartsev S., Kolubaeva Y., Nalivayko N. Chemical and microbiological composition of groundwaters of decentralized water supply of southern and central districts of Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 5, pp. 29–41. In Rus.
- Timoshenkova A.N., Moraru C.Ye., Pasechnik Ye.Yu., Tokarenko O.G., Butoshina V.A. Ground and Intermediate Water Equilibrium with Water-Bearing Rock Minerals (Moldova) under Anthropogenic Impact. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, Iss. 1, Article number 012025. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012025> (accessed 15 August 2016).
- Guseva N.V., Otakulova Yu.A. Geochemistry of groundwater in Tashkent artesian basin (Republic of Uzbekistan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. The Planet resources*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 127–136. In Rus.
- Shvartsev S.L., Kolpakova M.N., Isupov V.P., Vladimirov A.G., Ariunbileg S. Geochemistry and chemical evolution of saline lakes of western Mongolia. *Geochemistry International*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 388–403.
- Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters. Theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2012. 672 p.
- Ryzhenko B.N., Cherkasova E.V. Chemical composition of natural waters and brines as a result of hydrogeochemical processes in water–rock–gas systems *Geochemistry international*, 2013, vol. 50, no. 13, pp. 1101–1150.
- Shvarov Yu.V. Algorithmization of the numeric equilibrium modeling of dynamic geochemical processes. *Geochemistry international*, 1999, vol. 37, no. 6, pp. 571–576.
- Shvarov Yu.V. HCh: new potentialities for the thermodynamic simulation of geochemical systems offered by windows. *Geochemistry international*, 2008, vol. 46, no. 8, pp. 834–839.
- Chudaev O., Shvartsev S., Ryzhenko B. VI Vernadsky and main research avenues in modern hydrogeochemistry. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, vol. 7, pp. 163–166.
- Karpov I., Kiselev A., Letnikov F. *Khimicheskaya termodinamika v khimii i petrologii* [Chemical thermodynamics in geochemistry and petrology]. Irkutsk, SB AS USSR Press, 1971. 385 p.
- Pavlov S.Kh., Chudnenko K.V. Modeling of the formation of thermal waters enriched in nitrogen gas. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Water–Rock Interaction*. Guanajuato, Mexico, 2010. pp. 793–796.
- Galimov E.M. Physicochemical computer simulation of hydrogeochemical and hydrothermal processes in Russia. *Geochemistry international*, 2012, vol. 50, no. 13, pp. 1045–1047.
- Perez I.J., Heidemann R.A. SPCALC: a new multiphase geochemical speciation software. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Water–Rock Interaction*. Guanajuato, Mexico, 2010. pp. 805–808.

19. Brusky I., Sembera J., Paces T. Modeling of long-term water rock interaction in the Bohemian Cretaceous Basin *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, vol. 7, pp. 782–785.
20. Borisov M.V., Shvarov Yu.V. *Termodinamika geokhimicheskikh protsessov* [Thermodynamics of geochemical processes]. Moscow, MSU Press, 1992. 256 p.
21. Fuge R. Water soluble chlorine in granite rocks. *Chem. Geology*, 1979, vol. 25, no. 1/2, pp. 169–174.
22. Svedrup H.U. *The kinetic of base cation release due to chemical weathering*. Lund, Lund University Press, 1990. 246 p.
23. Lasaga A.C. Chemical kinetics of water-rock interaction. *J. Geophys. Res.*, 1984, vol. 89, no. 6, pp. 4009–4023.
24. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda. T. 1. Sistema voda-poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie* [Geological Evolution and Self Organization of the Water–Rock System. Vol. 1. Water–Rock System in the Earth's Crust: Interaction, Kinetics, and Modeling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, SB RAS Press, 2005. 244 p.
25. Mironenko M.V., Zolotov M.Yu. Ravnovesno-kineticheskaya model vzaimodeystvy voda-poroda [Equilibrium-kinetic model of water–rock interaction. *Geochemistry international*, 2012, vol. 50, no. 1, pp. 1–7.
26. Mironenko M.V., Cherkasova E.V. Kinetiko-termodinamicheskaya model formirovaniya lateritnoy kory vyvetrivaniya po gavay-skim bazaltovym tufam. Verifikatsiya modeli [Kinetic-thermodynamic model of lateritic weathering crust on the Hawaiian basalt tuffs. Verification of the model]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi prodami. Materialy vtoroy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the Second Russian Scientific Conference with international participation. Geological evolution of water–rock interaction]. Vladivostok, 2015. pp. 155–158.

Received: 28 March 2017.

#### Information about the authors

**Boris N. Ryzhenko**, Dr. Sc., chief researcher, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences.

**Evgeniya S. Sidkina**, Cand. Sc., senior researcher, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 24.04.2017. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,49. Уч.-изд. л. 12,20.  
Заказ 129-17. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ