

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»

---



ISSN 2413-1830

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 327, № 5, 2016

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Редакционная коллегия**

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. 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)  
Алексеенко 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)  
Кириянова 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 по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

**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 2413-1830

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке 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
- Прикладные задачи технологий георесурсов.

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)

Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
National Research Tomsk Polytechnic University



ISSN 2413-1830

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

Volume 327, № 5, 2016

TPU  PUBLISHING

Tomsk

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

**Editorial Board**

Dyachenko A.N., 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, 2016

**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).

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;
- Applied Aspects of Geo Assets technologies.

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

- Петролого-геохимические черты рудовмещающего субстрата в гидротермальных месторождениях золота. Часть 2. Петролого-геохимическая концепция околорудного метасоматизма**  
Кучеренко И.В.
- Предпосылки применения просвечивающей электронной микроскопии как геохимической методики выявления миграционных минеральных форм над углеводородными залежами**  
Бредихин Н.П., Соболев И.С.
- Химический и микробиологический состав подземных вод децентрализованного водоснабжения южных и центральных районов Томской области**  
Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Шварцев С.Л., Колубаева Ю.В., Наливайко Н.Г.
- Формы нахождения редкоземельных элементов в торфах Западной Сибири**  
Арбузов С.И., Маслов С.Г., Ильенок С.С., Перегудина Е.В.
- Минеральные микровключения в глауконитах Бакcharского месторождения (Томская область)**  
Рудмин М.А., Мазуров А.К., Рева И.В.
- Краткосрочный прогноз бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС**  
Бураков Д.А., Путинцев Л.А.
- Результаты теоретических и опытных работ по изучению механизма работы буровых компоновок со смещенным центром масс поперечного сечения**  
Нескоромных В.В., Петенёв П.Г.
- Методика реконструкции зонального водного стока в Западной Сибири в голоцене**  
Савичев О.Г., Решетько М.В., Моисеева Ю.А.
- Определение временного сдвига между сейсмическими трассами на основе анализа их фазочастотных характеристик**  
Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Нгуен Суан Хунг, Злобина Е.В., Лаевский В.Е. (Geringer V.)
- Экспериментальное определение интегральной степени черноты сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий**  
Анисимов М.В., Лычагин Д.В., Рекунов В.С., Таалайбеков Ж.Т.
- Химический состав нефти Крапивинского месторождения (сообщение 2)**  
Коваленко Е.Ю., Яновская С.С., Сагаченко Т.А., Мин Р.С.
- Накопление тяжелых металлов прибрежно-водной растительностью водоемов вблизи г. Жлобина Гомельской области Республики Беларусь**  
Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Жадко С.В.

## CONTENTS

- 6 Petrologic and geochemical features of ore-containing substratum in hydrothermal gold deposits. P. 2. Petrologic and geochemical concept of near-ore metasomatism**  
Kucherenko I.V.
- 20 Prerequisite to applying transmission electron microscope as a geochemical method for detecting migration forms of minerals over hydrocarbon deposits**  
Bredikhin N.P., Sobolev I.S.
- 29 Chemical and microbiological composition of groundwaters of decentralized water supply of southern and central districts of Tomsk region**  
Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Shvartsev S.L., Kolubaeva Yu.V., Nalivayko N.G.
- 42 Modes of occurrence of rare earth elements in peats of West Siberia**  
Arbuzov S.I., Maslov S.G., Ilenok S.S., Peregudina E.V.
- 54 Mineral microinclusions in glauconite of Bakchar deposit (Tomsk region)**  
Rudmin M.A., Mazurov A.K., Reva I.V.
- 65 Short-term forecast of lateral inflow in Boguchanskaya hydropower station reservoir**  
Burakov D.A., Putintsev L.A.
- 75 Results of theoretical and skilled works on studying the mechanism of operation of boring configurations with a displaced cross section mass center**  
Neskoromnykh V.V., Petenev P.G.
- 87 Methods of reconstruction of a zonal runoff in western Siberia in Holocene**  
Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A.
- 97 Definition of temporary shift between seismic traces on the basis of the analysis of their phase-frequency characteristics**  
Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Nguen Xuan Hung, Zlobina E.V., Geringer V.
- 106 Experimental definition of integrated emissivity factor of ultrathin fluid composite heat insulating coatings**  
Anisimov M.V., Lychagin D.V., Rekunov V.S., Taalaybekov Zh.T.
- 116 Chemical composition of petroleum from Krapivinskoye oilfield (message 2)**  
Kovalenko E.Yu., Yanovskaya S.S., Sagachenko T.A., Min R.S.
- 124 Accumulation of heavy metals by riverside and water vegetation in water bodies near the city of Zhlobin, Gomel region, Belarus**  
Dayneko N.M., Timofeev S.F., Zhadko S.V.

УДК 553.411.071.242.4+550.4

## ПЕТРОЛОГО–ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ РУДОВМЕЩАЮЩЕГО СУБСТРАТА В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗОЛОТА ЧАСТЬ 2. ПЕТРОЛОГО–ГЕОХИМИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОКОЛОРУДНОГО МЕТАСОМАТИЗМА

Кучеренко Игорь Васильевич,  
kucherenko.o@sibmail.com

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

**Актуальность исследования** заключается в необходимости корректировки и углубления геологической (металлогенической) составляющей теории образования гидротермальных месторождений золота, в рамках которой противоречивые представления о геологической обусловленности рудообразования (источниках энергии и металлоносных флюидов) укладываются в четыре конкурирующих, исключающих одна другую, гипотезы, вследствие чего невозможно разработать комплекс эффективных прогнозно-поисковых критериев оруденения.

**Цель исследования:** посредством использования альтернативной существующим методологии и следующих из нее методов петролого-геохимических исследований рудовмещающего, в том числе черносланцевого, субстрата получить данные (достоверные факты), способные обеспечить: 1) доказательство принадлежности эпигенетических минеральных ассоциаций этапа рудообразования в толщах околорудно-измененных углеродистых (черных) сланцев, вопреки популярным представлениям, к метасоматическим формациям и, как следствие, вещественно-генетической однородности апочерносланцевых зональных метасоматических колонок (ореолов) с образованными в несланцевом (кристаллическом) субстрате; 2) на гипсометрических уровнях залегания оруденения доказательство внешних (внепородных) источников золота и сопровождающих металлов, сосредоточенных в рудах месторождений, образованных в толщах черных сланцев.

**Методы исследования:** 1) атомно-абсорбционный (чувствительность  $1 \cdot 10^{-8}$  мас. % для золота, серебра,  $5 \cdot 10^{-7}$  мас. % для ртути), контрольные нейтронно-активационный и химико-спектральный анализы на золото (чувствительность  $1 \cdot 10^{-8}$  и  $3 \cdot 10^{-8}$  мас. % соответственно); 2) расчеты статистических параметров распределения и баланса металлов в околорудном, межрудном пространстве месторождений с использованием двухуровневой системы выборок, обеспечивающие реконструкцию геологической истории химических элементов и, на этой основе, корректную оценку донорского потенциала горных пород, включая черные сланцы.

**Результаты исследования.** Распределение золота и сопровождающих металлов в околорудном пространстве подчиняется метасоматической зональности – околорудные геохимические ореолы всегда занимают меньшие объемы сравнительно с околорудными метасоматическими. Это выражается в субкларковых содержаниях (золота 0,5...1,2 мг/т) и низкой дисперсии распределения золота, серебра, ртути в разных породах, включая регионально-метаморфизованные на уровне мусковит-биотитового парагенезиса черные сланцы, вне и в подзоне слабого изменения фронтальной зоны околорудных метасоматических ореолов, и в последовательном увеличении этих параметров, а также золото-серебряного отношения и силы корреляционных связей золота с серебром от одной минерало-петрохимической зоны к другой по мере усиления околорудных метасоматических преобразований пород с достижением максимальных значений в тыловой зоне, тем больших, чем выше содержания металлов в рудах. Разработана и описана петролого-геохимическая концепция (модель) околорудного метасоматизма в мезотермальных месторождениях золота, включающая доказательства: а) принадлежности эпигенетических минеральных ассоциаций этапа рудообразования в толщах околорудно измененных углеродистых (черных) сланцев, вопреки метаморфогенной и полигенной гипотезам рудообразования, к метасоматическим пропилитовой и березитовой формациям, образованными в несланцевом (кристаллическом) субстрате; б) синрудного происхождения контрастных геохимических аномалий металлов (сверхкларковых их содержаний) в околорудном пространстве мезотермальных золоторудных месторождений, то есть внешних (внепородных на гипсометрических уровнях залегания оруденения) источников золота и сопровождающих металлов, сосредоточенных в рудах месторождений, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате.

Полученные результаты вписываются в систему доказательств геолого-генетического единства золоторудных месторождений обеих совокупностей, их принадлежности к мезотермальным и образования в черносланцевых толщах и несланцевом субстрате в составе золотопроизводящих антидромных флюидно-рудно-магматических гранит-диорит-долеритовых комплексов на поздних (базальтоидных) этапах их функционирования.

### Ключевые слова:

Гидротермальные месторождения золота, кристаллический (несланцевый) субстрат, черные сланцы, околорудные (рудовмещающие) зональные метасоматические, геохимические ореолы.

### Введение

В первой части статьи приведены образованные в разное геологическое время в разнообразном, включая черносланцевый, рудовмещающем субстрате созданные природой зональные околорудные околоразломные метасоматические колонки, составившие основу типовой универсальной модели околорудной метасоматической зональности в гидротермальных месторождениях золота [1–4].

Следующая из известной термодинамической теории метасоматической зональности в околорудной метасоматической колонки имеет мало общего с природной моделью. В последней не предусмотрено предписанное теорией общее снижение числа минеральных фаз от одной минеральной зоны к другой вплоть до «мономинеральности» тыловой (осевой) зоны, – напротив, возрастает число

и масса новообразованных минералов, компенсирующих синхронное растворение минералов исходных пород. В связи с этим возникает вопрос о жизнеспособности термодинамической теории метасоматической зональности, который обсуждается ниже. В соответствии с заявленной целью исследования обсуждению предшествует анализ результатов изучения распределения профильных (Au, Ag, Hg) металлов в окolorудном пространстве золоторудных месторождений на предмет оценки происхождения их повышенных, вплоть до аномальных, содержаний.

#### Металлы в окolorудном пространстве

Анализируется распределение во вмещающих месторождения породах трех металлов, обнаруживающих в рудах тесные геохимические связи, – золота, серебра, ртути (таблица). Аналитические данные о содержаниях металлов триады и статистические параметры их распределения в разнообразном

по составу и происхождению рудовмещающем субстрате обсуждаемых месторождений золота приведены в [2] и отчасти (для примера) в таблице.

Во всех вмещающих, в том числе черносланцевых, средах геохимические поля обладают сходными чертами строения.

Наиболее низкие субкларковые содержания металлов свойственны разным по составу и происхождению одного и разных месторождений породам фронтальной зоны метасоматических ореолов. Во всех подзонах этой зоны содержания золота, например, близки к 1,0...1,5 мг/т, иногда опускаясь до 0,5 мг/т или поднимаясь до 1,9 мг/т. Относительно низкие значения здесь же стандартного множителя (стандартного отклонения) содержаний подчеркивают слабую дисперсию распределения металлов на периферии метасоматических ореолов.

В направлении к тыловой зоне содержания и дисперсия распределения содержаний металлов,

**Таблица.** Оценка параметров распределения рудогенных элементов и корреляционных связей золота с рудогенными элементами в минеральных зонах окolorудных метасоматических ореолов гидротермальных золоторудных месторождений юго-восточного складчатого обрамления Сибирского кратона

**Table.** The appraisal of the distribution parameters of the oreogenous elements and gold correlation connections with oreogenous elements in mineral zones of hydrothermal gold-ore deposits near-ore metasomatic haloes in south-eastern folded frame of Siberian craton

Элементы Elements	Параметры распределения Distribution parameters	Минералого-петрохимические зоны и подзоны [число проб] Mineral-Petrochemic zones and subzones [number of samples]					
		Фронтальная/Frontal			Хлоритовая Chloritic	Альбитовая Albitic	Тыловая Rear
		Подзоны/Subzones					
		Слабого изменения Weak alteration	Умеренного изменения Moderate alteration	Интенсивного изменения Intensive alteration			
<b>Кристаллический (несланцевый) субстрат/Crystal (non-shale) substratum</b> <i>Ирокиндинское месторождение/Irokindinskoe deposit</i>							
<i>I. Альмандин-диопсид-двуполевошпатовые парагнейсы (AR)/I. Almandine-diopside-two-feldspathic paragneisses (AR)</i>							
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	0,7(1,1) [29]	0,6(0,7) [48]	0,7(0,7) [29]	0,7(0,8) [23]	16,5(47,0) [65]	49,9(228,8) [169]
	$t(s)$	2,1(1,8)	1,5(0,3)	1,5(0,3)	1,4(0,3)	4,0(94,0)	5,7(646,0)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	35,7(43,9)	50,0(55,9)	60,3(85,3)	56,8(92,7)	153,1(222,0)	134,3(268,1)
	$t(s)$	1,8(36,8)	1,7(25,3)	2,2(95,1)	3,2(109,8)	2,3(239,8)	2,9(590,8)
	$r(sr)$	<b>0,73</b> (0,12)	0,02(0,20)	0,38(0,22)	<b>0,68</b> (0,14)	<b>0,82</b> (0,06)	<b>0,50</b> (0,12)
	Au/Ag	0,02	0,01	0,01	0,01	0,1	0,37
Hg	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	17,1(22,0)	15,6(18,2)	19,3(34,4)	21,7(34,8)	19,7(33,4)	28,7(55,2)
	$t(s)$	2,0(17,0)	1,7(11,5)	2,4(56,5)	2,3(53,8)	2,6(47,0)	2,9(99,4)
	$r(sr)$	-0,07(0,19)	<b>-0,36</b> (0,13)	-0,10(0,18)	0,04(0,27)	0,05(0,11)	0,07(0,08)
	Au/Hg	0,04	0,04	0,04	0,03	0,83	1,74
<i>II. Граниты мигматитовой выплавки (AR)/II. Granites of migmatitic melting (AR)</i>							
Au	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	0,6(0,7)[28]	0,6(0,7)[10]	0,6(0,7)[17]	1,5(1,7)[49]	6,4(23,2)[99]	50,7(335,2)[24]
	$t(s)$	1,6(0,4)	1,4(0,2)	1,4(0,2)	1,8(0,9)	4,9(45,7)	10,6(688,3)
Ag	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	47,9(70,3)	58,9(77,2)	47,3(54,8)	19,0(26,1)	96,8(122,9)	158,5(318,5)
	$t(s)$	2,4(71,6)	2,4(50,2)	1,8(27,3)	2,3(19,8)	2,2(78,2)	3,1(513,4)
	$r(sr)$	0,18(0,27)	-0,08(0,35)	0,28(0,28)	-0,37(0,22)	<b>0,40</b> (0,15)	<b>0,81</b> (0,10)
	Au/Ag	0,01	0,01	0,01	0,07	0,06	0,32
Hg	$\bar{x}\bar{z}(\bar{x})$	20,6(24,1)	21,8(28,3)	16,2(30,1)	17,1(19,6)	27,8(41,0)	34,5(41,1)
	$t(s)$	1,7(16,6)	2,2(20,9)	2,5(55,1)	1,7(11,8)	2,4(45,9)	2,0(22,0)
	$r(sr)$	-0,15(0,27)	<b>-0,58</b> (0,24)	-0,20(0,29)	<b>0,49</b> (0,20)	0,14(0,18)	0,02(0,23)
	Au/Hg	0,03	0,03	0,04	0,09	0,23	1,47

Окончание таблицы

Table

Элементы Elements	Параметры распределения Distribution parameters	Минералого-петрохимические зоны и подзоны [число проб] Mineral-Petrochemic zones and subzones [number of samples]					
		Фронтальная/Frontal			Хлоритовая Chloritic	Альбитовая Albitic	Тыловая Rear
		Подзоны/Subzones					
		Слабого изменения Weak alteration	Умеренного изменения Moderate alteration	Интенсивного изменения Intensive alteration			
<b>Регионально-метаморфизованные углеродистые сланцевые толщи/Regional metamorphosed carbonaceous slate terranes</b>							
<i>Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit</i>							
III. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы кедровской свиты (R <sub>3</sub> ) III. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of kedrovskaya suite (R <sub>3</sub> )							
Au	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	1,2(1,6) [37]	0,7(1,5) [15]	1,1(1,7) [23]	1,8(2,6) [123]	3,9(6,9) [209]	5,8(15,3) [27]
	$t(s)$	2,1(1,5)	2,9(2,7)	2,7(1,6)	2,0(4,0)	2,8(9,5)	4,5(19,9)
Ag	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	26,7(32,1)	23,3(26,0)	56,6(91,7)	61,7(165,1)	135,8(223,4)	165,0(278,5)
	$t(s)$	1,9(20,9)	1,6(13,9)	2,6(116,6)	4,6(340,4)	2,6(359,5)	3,1(257,0)
	$r(sr)$	0,001(0,2)	<b>0,79</b> (0,11)	0,22(0,21)	0,21(0,12)	0,11(0,09)	<b>0,44</b> (0,16)
	Au/Ag	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04
Hg	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	18,0(26,3)	28,3(34,7)	22,0(30,4)	24,5(34,1)	17,5(23,5)	30,5(36,0)
	$t(s)$	2,8(20,7)	2,1(18,7)	2,2(27,0)	2,4(30,1)	2,1(20,6)	1,8(21,4)
	$r(sr)$	<b>0,35</b> (0,16)	<b>0,50</b> (0,22)	0,20(0,21)	-0,15(0,12)	-0,11(0,08)	<b>0,58</b> (0,13)
	Au/Hg	0,07	0,02	0,05	0,07	0,22	0,19
<i>Каралонское месторождение/ Karalonskoe deposit</i>							
IV. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы водораздельной свиты (R <sub>3</sub> ) IV. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of vodorazdel'naya suite (R <sub>3</sub> )							
Au	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	1,0(1,1) [15]	н/д	1,6(2,0) [11]	2,0(2,8) [34]	2,0(3,5) [7]	24,7(73,5) [6]
	$t(s)$	1,6(0,4)	н/д	1,9(1,8)	2,4(2,6)	2,8(5,1)	5,6(100,9)
Ag	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	25,1(35,1)	н/д	34,9(64,7)	45,6(65,1)	29,4(44,5)	53,3(60,2)
	$t(s)$	2,2(34,8)	н/д	2,9(99,3)	2,4(75,0)	2,9(39,9)	1,8(29,6)
	$r(sr)$	<b>0,56</b> (0,18)	н/д	<b>0,73</b> (0,14)	<b>0,52</b> (0,12)	<b>0,80</b> (0,13)	<b>0,70</b> (0,21)
	Au/Ag	0,04	н/д	0,04	0,04	0,07	0,4
Hg	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	32,4(37,3)	н/д	47,0(49,0)	58,0(68,6)	42,2(61,6)	44,6(46,5)
	$t(s)$	1,8(19,2)	н/д	1,4(14,8)	1,7(61,4)	2,5(63,5)	1,4(16,3)
	$r(sr)$	0,12(0,25)	н/д	0,007(0,3)	-0,22(0,16)	<b>0,55</b> (0,26)	-0,30(0,37)
	Au/Hg	0,03	н/д	0,03	0,03	0,05	0,55
<i>Ирокиндинский прогиб/Irokindsinskii trough</i>							
V. Углеродистые мусковит-биотитовые алевро-пелито-сланцы мухтунной свиты (R <sub>3</sub> ) V. Carbonaceous muscovite-biotitic aleuro-pelito-slates of muhtunnaiya suite (R <sub>3</sub> )							
Au	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	н/д	н/д	н/д	0,6(0,6) [39]	0,6(0,7) [24]	1,0 [1]
	$t(s)$	н/д	н/д	н/д	1,6(0,3)	1,6(0,5)	н/д
Ag	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	н/д	н/д	н/д	14,7(16,2)	19,8(25,7)	19,0
	$t(s)$	н/д	н/д	н/д	1,6(7,1)	2,1(19,0)	н/д
	$r(sr)$	н/д	н/д	н/д	0,27(0,15)	<b>0,53</b> (0,15)	н/д
	Au/Ag	н/д	н/д	н/д	0,04	0,03	н/д
Hg	$\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$	н/д	н/д	н/д	15,1(17,8)	16,6(18,1)	12,5
	$t(s)$	н/д	н/д	н/д	1,8(10,4)	1,5(7,9)	н/д
	Au/Hg	н/д	н/д	н/д	0,04	0,04	0,08

Примечание. 1) I–V исходные породы. 2)  $\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$  – среднее соответственно геометрическое и арифметическое содержание, мг/т;  $t$  – стандартный множитель;  $s$  – стандартное отклонение содержаний, мг/т;  $r$  – коэффициент парной линейной корреляции элементов с золотом, выше уровня значимости обозначен жирным шрифтом;  $sr$  – стандартное отклонение коэффициента корреляции; н/д – нет данных. 3) Содержание Au и Ag определялось [1. Табл. 1], содержание Hg – атомно-абсорбционным методом (чувствительность 5 мг/т) в ЦЛ ПГО «Березовгеология» (г. Новосибирск) под руководством Н.А. Чарикова. 4) Расчеты выполнены Н.П. Ореховым.

Note. 1) I–V are the initial rocks. 2)  $\bar{x}\bar{x}(\bar{x})$  is the moderate geometric and arithmetic content accordingly, mg/t;  $t$  is the standard multiplication;  $s$  is the standard digression of the contents, mg/t;  $r$  is the coefficient of couple linear correlation of the elements with gold higher of significance level, in bold type;  $sr$  is the standard digression of the correlation coefficient; н/д is no data. 3) Content of Au and Ag was determined by [1. Table 1], Hg content was determined by means of atomic-absorption method (sensitivity is 5 mg/t) in CL «Bere-zovgeology» (Novosibirsk) under the guidance of N.A. Charikov. 4) The calculations were fulfilled by N.P. Orekhov.



как правило, возрастают, достигая в березитах тыловой зоны максимальных значений.

Содержания золота во внутренних альбитовой и тыловой зонах ореолов в абсолютном выражении зависят от степени золотоносности рудных тел, чего не наблюдается во фронтальной зоне. Зависимость выражается в том, что наиболее обогащены золотом породы этих зон в обрамлении рудных столбов и жил с крупными запасами металла и средними содержаниями его в рудах на уровне не менее десятков ... многих десятков г/т. Такую ситуацию представляют ореолы Ирокиндинского месторождения, внутренние зоны которых опробованы в том числе в обрамлении наиболее крупных с высокими промышленными параметрами Тулуинской, Юрасовской, № 30 жил. Среднее геометрическое содержание золота здесь достигает десятков мг/т, серебра – превышает 100 мг/т; заметно увеличивается содержание ртути. Синхронно и резко возрастают показатели дисперсии содержаний. Картина стабильного увеличения в метасоматитах внутренних зон содержаний металлов и дисперсии их распределения (последнее не всегда) сохраняется в ореолах, обрамляющих бедные руды, в частности в черных сланцах, со средними содержаниями золота не более нескольких г/т. Однако в обрамлении слабо золотоносных жил березиты тыловой зоны аподолеритовых ореолов Западного и аподиоритовых ореолов Кедровского месторождений [2], например, обогащены золотом до уровня всего нескольких мг/т. В обрамлении минерализованных зон в углеродистых сланцах (Каралонское месторождение, таблица) ситуация промежуточная, отвечающая невысокой их золотоносности, со средним содержанием золота, редко превышающим 10 г/т.

Субкларковые содержания металлов сохраняются и во внутренних зонах метасоматического ореола среди углеродистых сланцев в удалении от минерализованных (рудных) зон и при их отсутствии (мухтунная свита, таблица).

Обычны сильные корреляционные связи в объеме околорудных метасоматических ореолов в целом и во внутренних их зонах между золотом и серебром, эпизодические – между золотом и ртутью. При этом заметный рост содержаний ртути во внутренних зонах ореолов только в аподиоритовых и апосланцевых ореолах Кедровского месторождения сопровождается усилением здесь положительных связей ее с золотом (таблица).

Слабый или сильный рост золото-серебряного и золото-ртутного отношений вплоть до значений, свойственных рудам (0,5...1,5), в направлении к тыловой зоне и особенно в последней также обычны, но фиксируются не всегда. Рост означает изменение количественных соотношений металлов в рудах сравнительно с породами в ходе рудообразующих процессов в пользу золота, что свойственно мезотермальным месторождениям.

Параметры распределения (средние, дисперсия, Au/Ag-отношение) золота и серебра в мине-

ральных зонах рудовмещающего пропилит-березитового апочерносланцевого метасоматического ореола месторождения Чертово Корято повторяют с незначительными отклонениями картину распределения обоих металлов, характеризующую петролого-геохимическую модель. Относительно низкие средние содержания металлов триады во фронтальной зоне ореола, образованного в регионально-метаморфизованных на уровне мусковит-биотитового парагенезиса черных сланцах ранне-протерозойской михайловской свиты, отвечающие, вероятно, местным кларкам, более высоким сравнительно со значениями в черных сланцах позднерифейских водораздельной, кедровской, мухтунной свит Северного Забайкалья, также возрастают по мере усиления метасоматических преобразований пород вплоть до максимальных значений во внутренних зонах. Вместе с тем умеренный рост параметров распределения, невысокие абсолютные их значения согласуются с ситуацией в черных сланцах упомянутых свит. Однако в обсуждаемом месторождении не зафиксировано подобного направленного увеличения параметров распределения ртути, обычного в ореолах других месторождений. В свою очередь, заметный рост во внутренних зонах Au/Ag-отношения определяется опережающим накоплением здесь золота, резкое возрастание Au/Hg-отношения – при увеличении массы золота незначительным поступлением ртути. Последнее, вероятно, представляет исключение из общего правила.

#### Обсуждение результатов и выводы

Вещественно-генетическая однородность золоторудных месторождений, зафиксированная в петролого-геохимической модели рудовмещающего субстрата вне зависимости от его состава и происхождения, отражает универсальный характер золотопроизводящих систем, которые по совокупности доказательств квалифицированы как мезотермальные.

Достоверность модели определяется:

- повторяемостью состава и порядка минералого-петрохимической [1] и геохимической [2] (табл.) зональности околорудных метасоматических ореолов, представляющих сочетание березитовой во внутренних и пропиловитовой в промежуточной хлоритовой и фронтальной зонах формаций, во всех изученных золоторудных месторождениях, очевидно, – следствием геолого-генетического единообразия гидротермальных золотопроизводящих систем;
- подтверждением сочетания минеральных ассоциаций упомянутых формаций в природных метасоматических колонках с результатами экспериментального моделирования метасоматитов в лабораторных условиях [5].

В рассмотренных рядах минеральных замещений от фронтальной зоны к тыловой просматрива-

ется снижение числа минеральных фаз (актинолит-тремолит, эпидот, хлорит, альбит), которое должно было бы быть обусловлено последовательным от зоны к зоне переходом в подвижное состояние кальция, магния, железа, натрия, отчасти кремния, алюминия. Однако, учитывая состав минералого-петрохимических зон и результаты межзональных балансовых расчетов, следует констатировать, что, вопреки теории, удаляется, причём лишь из внутренних зон, только натрий, а выносимый частично кремний, вероятно, переотлагается в кварцевых жилах и прожилках, в то время как другие элементы остаются инертными, поскольку фиксируются здесь же, в минеральных зонах, в составе новообразованных хлорита, эпидота, карбонатов, серицита и других минералов. Следующий из известных положений теории метасоматической зональности мономинеральный состав осевой зоны, даже если за таковую принимается карбонатно-сульфидно-кварцевая жила, в средне-низкотемпературных метасоматических колонках не достигается, что подтверждается приведенными материалами и в экспериментах [5].

Предлагается следующее объяснение условий формирования полиминерального состава внутренних зон пропилит-березитовых метасоматических колонок.

Ключевое положение теории метасоматической зональности, как известно, опирается на представление о дифференциальной подвижности – инертности компонентов, регулируемых в основном изменяющимися в пространстве и времени термодинамическими и физико-химическими режимами метасоматического процесса.

Полное растворение минерала сложного состава на внутренней границе каждой минералого-петрохимической зоны сопровождается переходом в подвижное состояние и удалением из системы участвовавших в его составе подвижных в существующих условиях химических элементов и фиксации в образующихся минералах инертных. Скажем, высвобождаемые при растворении альбита на внутренней границе альбитовой зоны, смежной с тыловой березитовой, натрий почти полностью удаляется с растворами, а кремнезем и глинозем могут полностью или частично входить и входят в состав образующегося серицита. Высвобождаемые из хлорита, при замещении его мусковитом на границе хлоритовой и альбитовой зон, магний и железо переходят в образующиеся здесь же и в соседних альбитовой, березитовой зонах карбонаты, усложняя их состав. Высвобождаемый при замещении во фронтальной зоне биотита или амфибола хлоритом титан фиксируется в последнем в форме рутила (лейкоксена), образуя сагенитовую решетку, сохраняющуюся в замещающем хлорит на внутренней границе хлоритовой зоны мусковите. Эти и другие подобные факты наблюдаются в рядах минеральных замещений в обсуждаемых метасоматических ореолах от фронтальной минералого-пе-

трохимической зоны к тыловой, подтверждаются в периферийных зонах метасоматических ореолов балансовыми расчетами химических составов пород, изменяющихся здесь в основном посредством перераспределения внутренних ресурсов химических элементов.

Очевидно, для того, чтобы метасоматит в тыловой зоне формировался мономинеральным, необходимо удаление (вынос) из ореола всех последовательно от зоны к зоне приобретающих подвижность компонентов, кроме того или тех, которые, сохраняя инертность, фиксируются в минерале тыловой зоны. В кислотных метасоматитах (березите, грейзене) при РН растворов  $< 7$  это должен быть и есть кремнезем, а минерал – кварц. Другими словами, в метасоматическом процессе пропилит-березитового профиля система порода-раствор в объеме формирующегося ореола должна быть открыта только в сторону выноса компонентов. В отличие от теории в природе это условие не соблюдается.

Поступающие в разломно-трещинные структуры и инициирующие метасоматический процесс и рудообразование горячие металлоносные растворы, судя по оставленным ими вещественным следам, имеют чрезвычайно сложный состав растворенных химических соединений. Они образуют с трещинно-поровыми растворами вмещающих пород гидравлически единые разломно-поровые породно-флюидные системы, в которых при реализации концентрационно-диффузионного механизма массопереноса происходит встречная миграция растворенных компонентов в соответствии с градиентами их концентраций – из трещинного раствора в поровый и из порового – в трещинный. Получены эмпирические доказательства реализации концентрационно-диффузионного механизма массопереноса в контрастных по химическому составу средах – обмена компонентами ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и другими) между породами также и внутри ореолов [6]. Поступающие с растворами фемофильные петрогенные и рудогенные элементы мигрируют в боковые породы и обогащают прилегающие к раствороподводящим разломам метасоматиты внутренних зон окolorудных метасоматических ореолов с образованием в них контрастных аномалий. Удаляемые из тыловых зон ореолов натрий, частично кремнезем и компоненты, которыми обогащены исходные боковые породы, фиксируются в жилах и прожилках (кремнезем, иногда натрий, кальций, алюминий в кварце и полевых шпатах) или рассеиваются.

Таким образом, создающие метасоматические ореолы (колонки) и руды природные флюидно-породные системы открыты в сторону привноса и выноса компонентов. Судя по результатам балансовых расчетов вещества и минералого-химическому составу производных рудообразующих процессов, в метасоматические колонки, преимущественно в их внутренние зоны, в том числе руды, поступает почти все, доставляемое металлоносными раство-

рами, но, вопреки теории, из пород мало что удаляется. В этих условиях общее снижение числа минеральных фаз и образование мономинеральной породы невозможно.

Из приведенных материалов следует, что метасоматический процесс в окологорудном (околотрепцинном) пространстве функционирует в природе по-иному, в сравнении с прописанным в термодинамической теории метасоматической зональности, сценарию – удаления петрогенных компонентов из поровых флюидов в трещинные и в целом из системы вплоть до «мономинеральности» тыловой зоны окологорудных (околожильных) метасоматических колонок, за исключением одного компонента – натрия, вытесняемого более сильным основанием калием, не происходит.

По расчетам, количества выделяемого из пород кремнезема, до 30 мас. % в экспериментах [5], достаточно для образования кварцевых жил и прожилков. В природных индивидуальных колонках [1. Табл. 3] фиксируется вынос кремния из тыловой зоны до 50 мас. %. Сокращение мощности, а следовательно, и объема внутренних зон ореолов или их «выпадение» из колонок вверх по восстанию крупных рудоносных структур, сопровождаемое прекращением выноса кремния из пород при сохранении или увеличении масштабов кварцевого выполнения в верхних горизонтах месторождений (Сухой Лог, Тулуинская, № 30, Хребтовая жилы Ирокиндинского, Шаманские и другие жилы Кедровского месторождений и др.) иллюстрирует справедливость известного представления о способности кремния перемещаться в верхние части рудно-метасоматических колонн от уровней его выноса [7 и др.]. Вместе с тем вынос из рудовмещающих алюмосиликатных пород кремния в количествах, достаточных для образования кварцевого выполнения рудовмещающих структур, возможен при условии поступления в блоки метасоматизма и рудообразования щелочных флюидов с низкими концентрациями этого элемента или стерильных в отношении его.

Высокая контрастность положительных калиевых, углеродных (углекислотных), сернистых аномалий в изученных индивидуальных метасоматических колонках, постоянно повторяющаяся в разные геологические эпохи в различных геологических обстановках на разных гипсометрических уровнях месторождений при отсутствии достоверно зафиксированных ореолов выноса этих элементов и при региональных масштабах проявления аномалий вдоль рудоносных структур, свидетельствует о внешних относительно занятых месторождениями блоков источника сверхкларковых масс всех трех элементов.

Поступление с металлоносными растворами в область рудообразования значительных масс фемофильных элементов, фиксация их во внутренних окологорудных зонах метасоматических ореолов, снижение концентраций этих элементов

до кларковых уровней по мере удаления от глубинных разломов в сочетании с синхронным в этом же направлении снижением средних содержаний и запасов золота в рудах подчеркивают рудоконтролирующую роль глубинных разломов через их раствороподводящую функцию [1, 2].

В силу минералого-петрохимического и геолого-генетического родства метасоматитов и оруденения на рассматриваемых рудоносных площадях, нет оснований исключать преимущественно концентрационно-диффузионный механизм формирования окологорудных (окологорудных) метасоматических ореолов и метасоматической зональности в разном, в том числе черносланцевом субстрате, эмпирические доказательства реализации которого приведены в [6]. Факты указывают на то, что металлоносные флюиды поступают в блоки метасоматизма и рудообразования не путем фильтрации по поровому пространству пород, а по раствороподводящим разломам, консервируются в «слепых» структурах, образуя с порово-трещинными растворами пород единые гидравлически связанные, но химически неравновесные системы. Несколько фактов в доказательство этого имеют первостепенное значение.

Первый заключается в том, что мезотермальные золотые месторождения без исключений залегают в зонах деформационного воздействия глубинных разломов, группируясь в протяженные цепочки вдоль последних и в узлы в местах пересечения разломов. Этот факт демонстрирует их раствороподводящую роль.

Сформулированный вывод аргументируется и другими фактами – обогащением золотом и сопровождающими металлами внутренних зон метасоматических колонок, снижением содержаний металлов до кларковых уровней в периферийных, в частности во фронтальной, зонах [2] (табл.), прямой зависимостью концентраций металлов в метасоматитах внутренних зон от степени золотоносности (металлоносности) смежных с ними рудных тел, отсутствием признаков гидротермальных метасоматических изменений пород, в том числе и черных сланцев, за пределами сравнительно локальных окологорудных метасоматических ореолов. Черные сланцы, например, повсеместно в Ленском, Енисейском, Муйском и других районах вне локальных следующих разломам окологорудных метасоматических ореолов содержат регионально-метаморфический мусковит-биотитовый с турмалином парагенезис с совершенно свежим биотитом без признаков воздействия поздних гидротермальных растворов этапов рудообразования. Все эти факты доказывают перемещение металлов и петрогенных компонентов из разломно-трещинных растворов с высокими их концентрациями в менее концентрированные поровые растворы боковых пород и отложение основной их массы в полнопроявленных метасоматитах внутренних зон, обрамляющих разломно-трещинные рудовмещающие структуры.

Приведенные факты не вписываются в метаморфогенную гидротермальную и полигенную концепции рудообразования, предполагающие [8–14] местные породные источники золота и других металлов.

Углеродистые сланцевые толщи, как и иной рудовмещающий субстрат, подвержены аналогичному с ним околорудному метасоматизму, как это следует из приведенных данных, пропилит-березитовой формационной принадлежности. Это важно подчеркнуть, поскольку вопрос о сущности минералого-петрохимических преобразований терригенных сланцев в связи с рудообразованием в них, как и вопрос о механизмах массопереноса посредством транспорта потоком движущегося раствора или околоразломной диффузии, имеет ключевое значение в разработке геолого-генетической модели формирования золотого оруденения.

Известно, что минералого-петрохимические черты околорудного метасоматизма и его механизмы используются в качестве критериев различия магматогенно- и метаморфогенно-гидротермальных месторождений. Предполагается, например, возникновение в ареалах зеленосланцевого регионального метаморфизма минеральных зон – субфаций: биотит-хлоритовой, хлорит-серицитовой, альбит-серицитовой, серицит-карбонатной до начала рудообразования, и наложение на перечисленные ассоциации более поздних продуктов околорудного метасоматизма, близких к ним по составу [15–18]. Это предположение трансформируется в представление о минералого-петрохимической специфике апосланцевых околорудных метасоматитов, то есть к отрицанию принадлежности их, в том числе в Ленском районе, к метасоматическим формациям, свойственным и магматогенно-гидротермальным золоторудным месторождениям.

Между тем обсуждаемые материалы показывают, что порядок минералого-петрохимической зональности и направленность, сущность преобразований минералого-химического состава пород в минералого-петрохимических зонах апосланцевых метасоматических ореолов в золоторудных районах обрамления Сибирского кратона согласуются с таковыми в рудных полях, образованных в любом другом субстрате, а минералого-петрохимические зоны околорудных метасоматических ореолов аналогичны субфациям «регрессивного регионального метаморфизма»: биотит-хлоритовая субфация отвечает фронтальной зоне, хлорит-серицитовая – хлоритовой (эпидот-хлоритовой), альбит-серицитовая – альбитовой, серицит-карбонатная – тыловой (березитовой). Каких-либо промежуточных минеральных ассоциаций, образованных после прогрессивного этапа регионального метаморфизма нагревания (мусковит-биотитовый с турмалином, альмандин-биотитовый, альмандин-диопсидовый и другие парагенезисы), но до начала околорудного метасоматизма, в сланцевых толщах региона не обнаружено. Поэтому дискуссия о сла-

бости или интенсивности околорудных изменений в черных сланцах и о сходстве-различии минеральных ассоциаций регионального регрессивного метаморфизма и околорудного метасоматизма носит по существу терминологический характер: различными терминами обозначается одно и то же. Субфации «зеленосланцевого регрессивного метаморфизма» и соответствующие им минералого-петрохимические зоны околорудных метасоматических колонок – это следствие одного процесса – относительно локального сопровождаемого рудообразованием метасоматизма.

Поскольку мы имеем дело в сланцах с околорудным метасоматизмом в его конкретном формационном выражении, представляется корректным использовать терминологическую базу, применяемую при исследованиях метасоматических формаций с их зональными колонками, в обсуждаемых месторождениях сложными метасоматитами тыловой (березитовой) и периферийных (пропилитовых) зон. Это целесообразно сделать и по другим причинам. «Регрессивный метаморфизм» – это не изохимический процесс, каковым по определению должен быть метаморфизм, но аллохимический. В наше время по-прежнему называть аллохимический гидротермальный процесс метаморфизмом – это нонсенс. Гидротермальный метасоматизм на «регрессивном этапе регионального метаморфизма», как правило, происходит через сотни или многие сотни млн лет после прогрессивного собственно регионального зонального метаморфизма нагревания, овестьленного в минеральных зонах, занимающих обширные пространства со стабильными минеральными составами. Минеральные зоны позднего метасоматизма, в том числе сопровождаемого оруденением, контролируются иными – локальными структурами, в сравнении с минеральными зонами прогрессивного регионального метаморфизма. Поздний метасоматизм не связан с последним причинно-следственными связями, о чем можно судить по ряду признаков – значительным временным интервалам, отделяющим один процесс от другого, происхождению флюидов и другим. С учетом приведенных соображений к наиболее низкотемпературной фации зонального регионального метаморфизма нагревания следует относить породы, содержащие мусковит-биотитовый метаморфический парагенезис, а все более низкотемпературные ассоциации, на него наложенные (хлорит, эпидот, альбит и пр.), квалифицировать как производные позднего гидротермального метасоматизма, большей частью не имеющего отношения к предшествующему региональному метаморфизму.

При стандартной минералого-петрохимической зональности апочерносланцевых околорудных (рудовмещающих) метасоматических ореолов тыловая березитовая и смежная с ней альбитовая зоны с окислением в них керогена и, как следствие, осветлением пород до нормальных светло-

серых березитов и березитоидов (с альбитом) образованы эпизодически. Они слагают и обрамляют некоторые минерализованные зоны прожилково-вкрапленных золото-сульфидно-кварцевых руд и образуют мощные, до десятков метров, залежи массивных метасоматитов с прожилково-вкрапленной золото-сульфидно-кварцевой минерализацией [1. Табл. 3, колонки XVI–XXI]. Одна из таких мощных залежей изучена в углеродистых сланцах кедровской свиты (колонка XVI). В месторождении Чертово Корято зафиксировано осветление метасоматитов в части объема мощной хлоритовой зоны, вследствие чего она разделена на две – с керогеном и без него. Вместе с тем в экзоконтактах подавляющего большинства крупных золотоносных кварцевых жил и множества мелких прожилков сланцы не осветлены и изменены на уровне разных зон. Известны метасоматиты, по минералого-химическому составу отвечающие березитам, но сохранившие кероген и, соответственно, черный цвет.

По данным Е.А. Вагиной [19], изотопные отношения углерода карбонатов в осветленных апочерносланцевых березитах месторождения Чертово Корято имеют промежуточные значения  $\delta^{13}\text{C} = -12,0 \dots -15,0 \text{ ‰}$  между изотопно тяжелым (мантийным) углеродом жильных карбонатов  $\delta^{13}\text{C} = -7,0 \text{ ‰}$  (месторождение Сухой Лог) и изотопно легким восстановленным углеродом керогена черных сланцев ( $\delta^{13}\text{C} = -20,0 \dots -30,0 \text{ ‰}$ ). Это предполагает смешение изотопов при окислении керогена сланцев и последующий восстановительный режим в системе металлоносный трещинный раствор – поровый раствор – порода во время образования прожилков и жил. Вывод о реальности восстановительного режима металлоносных растворов при рудообразовании доказывается фактами образования черных березитов (лиственитов) в экзоконтактах золотоносных кварцевых жил (Иркиндинское месторождение) вследствие диссоциации кальцита кальцифиров до углекислоты и восстановления окисленного углерода до графита, эмульсия которого пропитывает образующийся березит. Восстановительный режим трещинных растворов, сменявший окислительный при продвижении потока растворов из очагов генерации и окисления на путях движения керогена, препятствовал окислению керогена в боках заполнявшихся уже восстановленными растворами трещин и образующихся кварцевых жил.

В поисках причин дефицита березитов в апочерносланцевых метасоматических ореолах золотых месторождений следует учитывать факты, наблюдаемые в золоторудных месторождениях, в которых мощные толщи углеродистых терригенных и терригенно-карбонатных сланцев сочетаются с прорывающими их телами магматитов и ультраметаморфитов зрелых очагово-купольных построек. В Кедровском, Каралонском, Уряхском, Зун-Холбинском месторождениях, например, залегаю-

щие в черных сланцах мощные золотоносные кварцевые жилы, минерализованные зоны прожилково-вкрапленных руд, мелкие прожилки, как правило, не сопровождаются березитами и осветлением пород, а соседние рудоносные кварцевые жилы среди гранитов, ультраметаморфитов обрамлены зонами хорошо проработанных березитов, слагающих тыловую зону околожилных зональных метасоматических колонок. Это означает, что ответ на вопрос о причинах явления заключается не в принципиальных геолого-генетических отличиях процессов рудообразования в черносланцевом, с одной стороны, и кристаллическом, с другой, субстрате, а в специфическом влиянии черносланцевой среды на физико-химическое состояние металлоносных растворов.

Корректная, как представляется, интерпретация результатов петролого-геохимического изучения рудовмещающего субстрата Сухоложского и Вернинского месторождений достигается посредством соотнесения апочерносланцевых метасоматических ореолов этих месторождений с типовой универсальной схемой метасоматической зональности. Их соответствие схеме (модели) доказывают следующие факты:

- сочетание в ореолах метасоматитов березитовой формации (березита и березитоида – березита с альбитом) во внутренних зонах и пропилитовой формации – в периферийных при минеральных замещениях в последних преобладающе за счет внутренних ресурсов петрогенных компонентов;
- аутентичный с ореолами других мезотермальных месторождений золота порядок минералого-петрохимической зональности рудовмещающих метасоматических ореолов;
- уменьшение числа минеральных фаз в смежных минералого-петрохимических зонах (полное растворение хлоритов, эпидота на внутренней границе хлоритовой, эпидотовой зон, альбита на внутренней границе альбитовой зоны) при увеличении массы минеральных новообразований от фронтальной зоны к тыловой;
- поликомпонентный кварц-серидит (мусковит)-анкерит (Mg-Fe карбонаты) с пиритом (сульфидами) состав тыловой зоны ореолов (березита);
- перераспределение в тыловой зоне щелочей с заменой более сильным основанием калием более слабого основания натрия, частичный вынос из нее кремния и отложение его в форме кварца в жилах и прожилках, поступление в ореолы восстановленной серы, углекислоты;
- фемофильная специализация золотоносных березитов с образованием контрастных аномалий калия, серы, углерода, фосфора, титана, магния, железа, кальция, марганца во внутренних зонах наиболее активной миграции компонентов.

Факт низких слабо различающихся или одинаковых значений средних содержаний золота, серебра, ртути в породах подзон слабого, умеренного,

интенсивного изменения фронтальной зоны околорудных (межрудных) метасоматических ореолов, образованных во всех обсуждаемых средах, доказывает инертность здесь металлов на этапе рудообразования и подчеркивает близость их содержаний к кларкам в соответствующих изверженных, осадочных, метаморфических породах, оцениваемым в [20]. Поэтому представляются справедливыми два положения: указанные значения отвечают местным (региональным) кларкам соответствующих исходных для метасоматизма пород; на удаленной периферии ореолов слабое воздействие растворов, обусловившее слабое изменение пород, не способно инициировать движение металлов – поступление их в породы или удаление из них. Ситуация меняется в более тыловых зонах ореолов.

Однообразная, повторяющаяся во всех средах, в том числе в черносланцевых толщах, картина распределения металлов в околорудном, межрудном пространстве золоторудных полей отражает тот факт, что в формировании геохимического содержания этого пространства действуют одни и те же законы.

Увеличение всегда и во всех породах, независимо от их предшествующей геологической истории, содержаний золота и серебра в направлении к тыловой зоне околорудных метасоматических ореолов и рудных тел, тем большее, чем выше степень золотоносности последних, служит указанием на то, что: 1) металлы мигрируют (диффундируют) при метасоматизме со стороны раствороподводящих и рудовмещающих разломов, в обрамлении которых интенсивность преобразований пород и контрастность аномалий наивысшая; 2) массы движущихся металлов определяются концентрацией их соединений в металлоносных растворах, унаследованной рудами и породами в их обрамлении; 3) концентрации металлов в породах прямо соотносятся со степенью их метасоматических преобразований.

Приведенные выводы не согласуются с утверждениями, согласно которым в золоторудных месторождениях отсутствуют признаки околорудных изменений вмещающих пород [21], а золото (металлы) способно (способны) мигрировать в породах без выраженных вещественных (минеральных) признаков их эпигенетических изменений [8]. В приложении к обсуждаемым месторождениям приведенные факты и выводы опровергают упомянутые утверждения. Вместе с тем они не противоречат представлению о диффузионном механизме массопереноса при околоразломном метасоматизме, следующему из анализа эмпирических данных [6], – по мере удаления от раствороподводящих каналов и рудовмещающих разломов, то есть источников, массы металлов, диффундирующих по заполненному горячими растворами трещинно-поровому пространству пород, постепенно снижаются.

В согласии с приведенными фактами и следующими из них выводами в околорудных метасомати-

ческих и геохимических ореолах изменяются количественные соотношения золота и серебра. На периферии ореолов в неизмененных или в едва затронутых изменениями породах с субкларковыми содержаниями этих металлов низкие величины Au/Ag-отношения отражают резко отличные их кларки – содержание золота здесь более чем на порядок ниже содержания серебра. В рудах мезотермальных месторождений ситуация иная – содержание золота мало отличается от содержания серебра или даже превышает его, хотя бывают и исключения. Поэтому увеличение во внутренних зонах метасоматических колонок Au/Ag-отношения в сторону приближения его значений к свойственным рудам (0,5...1,5) так же, как и предыдущие факты, подчеркивает генетическую связь околорудных геохимических ореолов с околорудными метасоматическими и рудами, то есть образование их всех в рамках единых рудообразующих процессов.

При этом околорудные геохимические ореолы во всех породах, в том числе в толщах углеродистых сланцев, занимают меньшие объемы сравнительно с околорудными метасоматическими – первые вписываются во вторые. Очевидно, металлы способны диффундировать с чрезвычайно малой скоростью на ограниченные расстояния, и этим определяется тот факт, что основная их масса, судя по концентрациям, фиксируется в ближнем обрамлении рудных тел – во внутренних безызотовой, не всегда в смежной более удаленной альбитовой зонах максимальных преобразований околорудных метасоматических колонок. Далее, в направлении периферии ореолов, метасоматические изменения пород происходят в условиях прогрева вмещающей среды преобладающе за счет внутренних ресурсов петрогенных компонентов, что доказывается расчетами их баланса и низкими значениями удельной массы подвергнутого движению (миграции) вещества. На дальнюю периферию, как отмечалось, способны диффундировать из раствороподводящих разломов весьма подвижные углекислота и сероводород, фиксируемые там среды бескарбонатных и бессульфидных, например, пород в новообразованных кальците и пирите.

Уместно обсудить известное различие между месторождениями сланцевого типа и образованными в кристаллическом субстрате, одно из ключевых в противопоставлении месторождений той и другой совокупности и заключающееся в разных, обычно несопоставимых масштабах запасов и содержаниях золота в тех и других объектах.

В сланцевых толщах распределение всей массы поступающих из очагов генерации металлоносных растворов по множеству швов и трещинно-поровому пространству крупных объемов трещиноватых хорошо проницаемых пород обеспечивает участие их в полном объеме в рудообразовании. Все поступающее золото фиксируется в рудах и околорудном пространстве месторождений, однако при очевидных низких содержаниях его соединений в ра-

створах (по расчетам, для образования рудных столбов со средними содержаниями металла 50 г/т достаточно его концентрации в растворах до 100...200 мг/дм<sup>3</sup>) возможности для концентрирования металла в образующихся рудах в условиях крупных объемов рудовмещающей среды ограничены.

В слабо трещиноватом в общем случае кристаллическом субстрате, напротив, существуют ограниченные возможности аккумуляции всей массы металлоносных растворов, поступающих по глубинным разломам, – они рассредоточиваются лишь по малообъемным оперяющим структурам, минерализованным зонам, не способным, в силу ограниченных объемов, вместить всю массу растворов. Часть их, вероятно, значительная, перемещаясь далее вверх по раствороподводящим глубинным разломам, рассеивается вблизи поверхности или на поверхности, не задерживаясь на физико-химических и термодинамических барьерах, создаваемых метеорными водами. Вместе с растворами рассеивается и золото. Однако многократное тектоническое подновление (дробление) ранних минеральных комплексов в малообъемных жилах и минерализованных зонах и неоднократно повторяющееся поступление в них новых порций растворов с золотом обеспечивает концентрирование металла, особенно в наиболее проницаемых участках жил – рудных столбах.

Вещественно-генетическая однородность, свойственная околорудным метасоматическим и геохимическим ореолам независимы от возраста, состава и происхождения вмещающего разновозрастные месторождения субстрата, согласуется с результатами изучения составов, последовательности, термодинамических и физико-химических режимов образования рудно-минеральных комплексов обсуждаемых совокупностей месторождений золота, фазового состояния металлоносных растворов, в том числе при отложении продуктивных ассоциаций, составов и соотношений концентраций растворенных в растворах окисленных и восстановленных газов [22]. Однообразно повторяются температурные градиенты – повышение температур отложения ранних зарождений кварца каждого последующего рудно-минерального комплекса сравнительно с температурами отложения поздних зарождений кварца каждого предшествующего комплекса, подчеркивающие в сочетании с другими фактами пульсационный режим функционирования гидротермальных систем.

Присутствие в изученных месторождениях послегранитных дорудных, внутрирудных, послерудных даек умеренно щелочных долеритов в разных сочетаниях отражает чередующиеся во времени инъекции металлоносных растворов, базальтовых расплавов и, следовательно, – рудообразование в условиях высокой магматической активности мантии [23]. Преобразование внутрирудных даек долеритов среди слабо измененных или неизмененных

пород в полно проявленные (до 100 об. %) метасоматиты с участием (до 50...60 об. %) в их составе типоморфных высокотемпературных обыкновенной роговой обманки и биотита, отсутствующих в околорудных березитах и пропилитах, обусловлено флюидопроводящей в горячем состоянии функцией даек, внедрением в дайки и фильтрацией в них металлоносных растворов через промежутки времени, в течение которых дайки не успевали остыть.

Участие в составе околорудных, в том числе апочерносланцевых, березитов в ближнем обрамлении (до 1,5 км), рудоконтролирующих через раствороподводящую функцию глубинных разломов, и аподайковых (аподолеритовых) метасоматитов контрастных аномалий ассоциации фемофильных элементов – P, Ti, Mg, Fe, Ca, Mn [23, 24] в сочетании с приведенными фактами, данными об отвечающих метеоритному стандарту изотопных отношениях серы сульфидов и углерода метасоматических карбонатов руд доказывает генерацию металлоносных растворов в очагах аномальной мантии.

Предлагаемая и реализованная методика формирования геохимических выборок способна обеспечить создание, пополнение региональных, а в перспективе – глобального банков корректных геохимических данных. Корректность достигается аккумуляцией в банках только проб с реконструированной геологической историей горных пород и химических элементов в них. Пробы пород с диагностикой на уровне «углеродистые сланцы», «измененные углеродистые (углистые) сланцы», «сульфидизированные сланцы» и пр., обычной во множестве публикаций, в этом случае неуместны. Напротив, аналитические данные для проб с реконструированной геологической историей формирования их современного итогового минералого-химического и геохимического содержания пригодны для генетического анализа и генетических обобщений, необходимых для углубления теории и достижения прикладных целей.

Таким образом, результаты петролого-геохимических исследований дополняют полученную ранее систему доказательств геолого-генетического единства золоторудных месторождений обеих обсуждаемых совокупностей, их принадлежности к мезотермальным и образования в черносланцевых толщах и несланцевом субстрате в рамках функционирования золотопродуцирующих антидромных флюидно-рудно-магматических гранитдиорит-долеритовых комплексов на поздних (базальтоидных) этапах их становления [23].

#### Заключение

Начатая более ста лет назад и продолжающаяся до сих пор дискуссия по проблеме образования гидротермальных месторождений золота, сопровождаемая увеличением со временем числа гипотез до четырех с их многочисленными вариантами, представляет очевидное свидетельство того, что мето-

дология и следующие из нее методы решения ряда ключевых вопросов проблемы не адекватны задачам исследований. Наглядным доказательством этому служит, в частности, история оценки принадлежности околорудных изменений черных сланцев к производным регионального метаморфизма или локального метасоматизма, а околорудных метасоматитов, соответственно, к метаморфическим фациям и субфациям или метасоматическим формациям. Известна также противоречивая оценка источников сосредоточенных в рудах образованных в несланцевом (кристаллическом) и черносланцевом субстрате месторождений металлов, в том числе золота. Многовариантные решения обозначенных вопросов при дефиците достоверных фактов служат питательной средой для поддержания в конкурентоспособном состоянии существующих гипотез рудообразования.

Решить оба обсуждаемых в статье вопроса теории рудообразования без реконструкции геологической истории горных пород, петрогенных и рудогенных элементов в них, следующей из понимания геохимии отечественными основоположниками ее В.И. Вернадским и А.Е. Ферсманом, невозможно – как показал столетний опыт, дискуссия будет продолжаться бесконечно долго.

Реализация этого подхода, напротив, обеспечила получение результатов, однообразно повторяющихся в разновозрастных месторождениях, образованных в разных по составу, возрасту, происхожде-

нию средах, что, как известно, служит доказательством достоверности сделанных выводов. Эти выводы согласуются с другими, следующими из анализа фактов, полученных в месторождениях обеих обсуждаемых совокупностей и раскрывающих тектоно-геодинамические режимы их образования, последовательность, термодинамические и физико-химические условия отложения рудно-минеральных комплексов, причинно-следственные связи рудообразования с плутоническим магматизмом.

Непротиворечивые, взаимно дополняющие один другой выводы образуют ансамбль, составляющий основу концепции образования мезотермальных (плутоногенных) месторождений золота, обоснование и содержание которой приведено в цитированных в статье и других публикациях автора, а формулировка дана выше.

Судя по отрывочным данным, опубликованным в многочисленных, в том числе зарубежных работах, можно предполагать, что сфера приложения концепции не ограничивается южным горноскладчатым обрамлением Сибирского кратона, но может быть распространена на другие золоторудные районы планеты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». Гос. контракт № П238 от 23.04.2010 г.*

*Автор выражает благодарность м-м Т.А. Сыресиной, подготовившей статью к печати.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучеренко И.В. Петролого-геохимические черты рудовмещающего субстрата в гидротермальных месторождениях золота. Часть 1. Петрология околорудного метасоматизма // Известия Томского политехнического университета. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 55–68.
2. Kucherenko I.V. Petrologic-geochemic evidence of geologic-genetic uniformity of gold hydrothermal deposits formed in black-shale and non-shale substratum // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2007. – V. 311. – № 1. – P. 24–33.
3. Cherkasova T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymineral zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012003/pdf> (дата обращения: 10.03.2016).
4. Kucherenko I., Zhang Yuxuan, Abramova R. Mineral-petrochemical wallrock alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012006/pdf> (дата обращения: 10.03.2016).
5. Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород. – М.: Наука, 1989. – 349 с.
6. Кучеренко И.В. Гидродинамика трещинно-поровых флюидно-породных взаимодействий и механизм массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 37–43.
7. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
8. Goldberg J.S., Abramson G., Los V.L. Depletion and enrichment of exploration for mineral deposits // Geochemistry Exploration, Environment Analysis. – 2003. – V. 3. – P. 281–293.
9. Metallogeny of gold deposits of China / Shao Jun, Hui De-feng, Kong Xiang-min, Shou Nai-wu // Geology and Resources. – 2004. – V. 13. – № 4. – P. 246–250.
10. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, R. Francois, L.V. Danyushevsky, Chang Zhaoshan // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
11. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia / A.I. Khanchuk, L.P. Plyusnina, E.M. Nikitenko, T.V. Kurmina, N.N. Barinov // Russia Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
12. Synsedimentary to Early Diagenetic Gold in Black Shale-Hosted Pyrite Nodules at the Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia / J.A. Steadman, R.R. Large, S. Meffre, P.H. Olin, L.V. Danyushevsky, D.D. Gregory, I. Belousov, E. Lounejeva, T.R. Ireland, P. Holden // Economic Geology. – 2015. – V. 110. – № 5. – P. 1157–1191.
13. Gold mineralization in Proterozoic black shales: Example from the Haoyaoerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton / Wang Jianping, Liu Jiajun, Peno Runmin, Liu Zhenjiang, Baisheng Zhao, Zan Li, Yufeng Wang, Chonghao Lui // Ore geology Reviews. – 2014. – V. 63. – P. 150–159.
14. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead, Z. Chang, S.E. Gilbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.



15. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышев, С.Е. Борисовский // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
16. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
17. Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. – 2009. – № 10. – С. 1108–1117.
18. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 8. – С. 3–16.
19. Вагина Е.А. Изотопный состав углерода и кислорода в рудах золотого месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 360. – С. 168–171.
20. Ярошевский А.А. Распространенность химических элементов в земной коре // Геохимия. – 2006. – № 1. – С. 54–62.
21. Альтшулер М.И. Тектоногенно-электрохимическая дифференциация вещества земной коры как механизм рудогенеза // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 1. – С. 30–38.
22. Вагина Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис месторождения золота Чертово Корято (Патомское нагорье): дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Томск, 2012. – 141 с.
23. Kucherenco I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 24. – 012024. URL: [http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024/pdf/1755-1315\\_24\\_1\\_012024.pdf](http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024/pdf/1755-1315_24_1_012024.pdf) (дата обращения: 10.03.2016).
24. Kucherenco I.V., Gavrilo R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep // International Journal of applied and fundamental research. – 2011. – № 1. – P. 37–43.

*Поступила 24.03.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Кучеренко И.В.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.411.071.242.4+550.4

## PETROLOGIC AND GEOCHEMIC FEATURES OF ORE-CONTAINING SUBSTRATUM IN HYDROTHERMAL GOLD DEPOSITS

### P. 2. PETROLOGIC AND GEOCHEMICAL CONCEPT OF NEAR-ORE METASOMATISM

Igor V. Kucherenko,  
kucherenko.o@sibmail.com

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

**The relevance** of the research is caused by the necessity to correct and elaborate on geological (metallogenical) component of the hydrothermal gold deposits formation theory within the framework of which the conflicting ideas about ore-formation geological making (energy and metalliferous fluids sources) go in four competing hypotheses eliminating one other. Therefore it is impossible to develop a complex of effective forecast-search mineralization criteria.

**The main aim** of the study is to prove: 1) the belonging of epigenetic mineral associations at the ore-formation stage in near-ore altering black shales series to metasomatic formations, contrary to the wide-spread ideas, and, as consequence, material-genetic similarity of apblackshales zoning metasomatic columns (haloes) with those, formed in non-shale (crystalline) substratum; 2) external (non-rock) sources of gold and other metals, concentrated in deposits formed in black shales series.

**The methods used in the study.** 1) Atom-absorption (sensitivity  $1 \cdot 10^{-8}$  wt. % for gold, silver,  $5 \cdot 10^{-7}$  wt. % for mercury), controlling neutron-stimulate, chemical-spectrum analysis for gold (sensitivity  $1 \cdot 10^{-8}$  and  $3 \cdot 10^{-8}$  wt. % accordingly). 2) Calculations of statistical parameters of metal distribution and balance in near-ore expanse of deposits using two-level system of selections, to ensure reconstruction of chemical elements geological history and proper appraisal of donor potential of the rocks including black shales.

**The results.** 1) Distribution of gold and accompanying metals in near-ore space is subject to metasomatic zoning – near-ore geochemical haloes always take up lesser volumes comparatively with the near-ore metasomatic ones. It is expressed in subclark contents (0.5–1.2 mg/t) and low distribution dispersion of gold, silver, mercury in various rocks, including black shales regionally metamorphosed on muscovite-biotite paragenesis level outside and in weak alteration subzone of frontal zone of near-ore metasomatic haloes, and in sequential increase of these parameters, as well as Au-Ag-relation and correlative connections between gold and silver from one mineral-petrochemical zone to another at intensification of near-ore metasomatic rocks alterations with achievement of maximum quantities in rear zone the more the higher metal contents in ores. 2) The Petrologic Geochemic concept (model) of the near-ore metasomatism in the mesothermal gold deposits is developed and described. It includes: a) the proofs of the article of ore-formation stage epigenetic mineral associations in near-ore altering black shales series, contrary to metamorphogenous and poligenous ore-formation hypothesis, to metasomatic formations, formed in non-shales (crystalline) substratum; b) sinore origin of contrasting geochemic anomalies of metals (their beyond-clark contents) in near-ore mesothermal gold deposits space, that is external (non-rock) of gold and other metals sources, concentrated in deposits formed in black shales series and crystalline substratum.

The results obtained fit in well in the proofs system of the geologic genetic of discussing combinations of gold-ore deposits monotony, their belonging to mesothermal ones and formation in black shales series and non-shale substratum in composition of gold-productive antidromic fluid-ore-magmatic granite-diorite-dolerite complexes on late (basaltoid) stages of their functioning.

#### Key words:

Hydrothermal gold deposits, crystalline (non-shale) substratum, black shales, near-ore (ore-containing) zoned metasomatic, geochemic haloes.

The research was financially supported by the Federal Education Agency. Federal Target Program «Academic and teaching staff of the innovative Russia for 2009–2013». State contract no. П238, 23.04.2010.

The author expresses thanks to T.A. Syresina for preparing the paper for publication.

#### REFERENCES

1. Kucherenko I.V. Petrologic and geochemic features of ore-containing substratum in hydrothermal gold deposits. P. 1. Petrology of the near-ore metasomatism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 55–68. In Rus.
2. Kucherenko I.V. Petrologic-geochemic evidence of geologic-genetic uniformity of gold hydrothermal deposits formed in black-shale and non-shale substratum. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 24–33.
3. Cherkasova T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymineral zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, article number 012003. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/27/1> (accessed: 10.03.2016).
4. Kucherenko I., Zhang Yuxuan, Abramova R. Mineral-petrochemical wallrock alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, article number 012006. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/27/1> (accessed: 10.03.2016).
5. Zaraysky G.P. *Zonalnost i usloviya obrazovaniya metasomaticheskikh porod* [Zoning and formation conditions of metasomatic rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 349 p.
6. Kucherenko I.V. Hydrodynamics of fracture-pore fluid-rock interactions and mechanism of mass transfer in near-fracture hydrothermal metasomatism processes. *Prospect and protection of mineral resources*, 2010, no. 11, pp. 37–43. In Rus.
7. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
8. Goldberg J.S., Abramson G., Los V.L. Depletion and enrichment of exploration for mineral deposits. *Geochemistry Exploration, Environment Analysis*, 2003, vol. 3, pp. 281–293.

9. Shao Jun, Hui De-feng, Kong Xiang-min, Shou Nai-wu. Metallogeny of gold deposits of China. *Geology and Resources*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 246–250.
10. Large R.R., Maslennikov V.V., Francois R., Danyushevsky L.V., Chang Zhaoshan. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
11. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M., Kurmina T.V., Barinov N.N. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia. *Russia Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
12. Steadman J.A., Large R.R., Meffre S., Olin P.H., Danyushevsky L.V., Gregory D.D., Belousov I., Lounejeva E., Ireland T.R., Holden P. Synsedimentary to Early Diagenetic Gold in Black Shale-Hosted Pyrite Nodules at the Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, no. 5, pp. 1157–1191.
13. Jianping Wang, Jiajun Liu, Runmin Peno, Zhenjiang Liu, Baisheng Zhao, Zan Li, Yufeng Wang, Chonghao Lui. Gold mineralization in Proterozoic black shales: Example from the Haoyao-erhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton. *Ore geology Reviews*, 2014, vol. 63, pp. 150–159.
14. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
15. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shhegolkov Yu.V., Alyshev E.I., Borisovsky S.E. Near-ore metasomatism of the terrigenous carbonaceous rocks in Lensk gold-ore region. *Geology of ore deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46. In Rus.
16. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Correlation of metamorphism and ore-formation processes in Sukhoi log gold black-shaly deposit according to U-Th-Pb-isotope SHRIMP-dating of the accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 32–64. In Rus.
17. Kryazhev S.G., Ustinov V.I., Grinenko V.A. The fluid regime special features of gold deposit Sukhoi Log formation by isotopic-geochemical data. *Geochemistry International*, 2009, no. 10, pp. 1108–1117. In Rus.
18. Gavrillov A.M., Kryazhev S.G. Mineral-geochemic special features of Sukhoi Log deposit ores. *Prospect and protection of mineral resources*, 2008, no. 8, pp. 3–16. In Rus.
19. Vagina E.A. Isotope composition of carbon and oxygen in ores of Chertovo Koryto gold deposit (Patom mountain land). *Tomsk State University Journal*, 2012a, no. 360, pp. 168–171. In Rus.
20. Yaroshevsky A.A. Dissemination of chemical elements in earth crust. *Geochemistry International*, 2006, no. 1, pp. 54–62. In Rus.
21. Altshuler M.I. Tectonogenous-electrochemical differentiation of earth crust substratum as ore deposition mechanism. *Prospect and protection of mineral resources*, 2007, no. 1, pp. 30–38. In Rus.
22. Vagina E.A. *Mineralnye komplekсы rud i genezis mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore)*. Dis. Kand. nauk [Mineral ore complexes and origin of the Chertovo Koryto deposit (Patom highland). Cand. Diss.]. Tomsk, 2012. 141 p.
23. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, 012024. Available at: [http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024/pdf/1755-1315\\_24\\_1\\_012024.pdf](http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024/pdf/1755-1315_24_1_012024.pdf) (accessed: 10.03.2016).
24. Kucherenko I.V., Gavrillov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep. *International Journal of applied and fundamental research*, 2011, no. 1, pp. 37–43.

Received: 24 March 2016.

#### Information about the authors

Igor V. Kucherenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.84.094.2

## ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ КАК ГЕОХИМИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ МИГРАЦИОННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ФОРМ НАД УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ

Бредихин Николай Петрович<sup>1</sup>,  
bnp1991@mail.ru

Соболев Игорь Станиславович<sup>1</sup>,  
geolsob@yandex.ru

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

**Актуальность исследования** обусловлена необходимостью разработки методики нахождения и определения миграционных форм металлических соединений над контурами углеводородных залежей на поверхности Земли, так как существующая в настоящее время информация о возможности переноса металлов с уровня залежи зачастую противоречива, что ставит под сомнение саму возможность геохимических поисков углеводородных залежей на основе информации о содержании металлов в приповерхностных горизонтах. Обсуждаемая методика сбора и анализа позволяет изучать наноразмерные соединения металлов, мигрирующих в составе газового потока до поверхности Земли. Появляется возможность установления происхождения найденного наноразмерного металлического соединения с допустимостью доказать глубинную природу происхождения вещества, найденного на дневной поверхности.

**Цель работы:** обзор и анализ существующих знаний о геохимических методах поисков месторождений нефти и газа; моделирование новой геохимической методики, связанной с исследованием образцов на просвечивающем электронном микроскопе, с возможностью установления частиц в наноразмерном состоянии.

**Методы исследования:** геохимические методы поиска и разведки месторождений нефти и газа, просвечивающая электронная микроскопия.

**Результаты.** Проведен обзор и анализ литературы на тему геохимических методов поисков залежей нефти и газа, проанализированы закономерности особенностей геохимических полей над месторождениями нефти и газа Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Предложена новая геохимическая методика поисков и разведки, которая способна выявлять минеральные формы нахождения химических элементов в наноразмерном состоянии на просвечивающем электронном микроскопе, в частности находить и идентифицировать миграционные металлические соединения.

### Ключевые слова:

Углеводородная залежь, миграция геогазового потока, геохимия, просвечивающая электронная микроскопия, наночастицы, эпигенетические изменения, миграционные формы металлов.

### Введение

Уже более века важнейшим источником энергии является углеводородное (УВ) сырье, и эта тенденция сохранится в ближайшее время. На сегодняшний день основным методом поисков и разведки является сейсморазведка. Но исключать важность остальных геохимических и геофизических методов при поиске нефти и газа нельзя. Необходим правильный подбор комплекса геохимических и геофизических методов из-за разностороннего влияния углеводородных залежей (УВЗ) на вмещающие породы над залежью, возможно применение широкого спектра прямых и полупрямых геохимических и геофизических методов. Характерные изменения этого влияния отражаются в различных геопоях, но только правильно подобранный комплекс методов для конкретных природных условий даст возможность выявить и проанализировать наиболее информативные изменения, связанные с влиянием УВЗ.

### Геохимия

В 1908 году, когда геохимия еще не существовала как отдельная наука, G.D. Harris описал при-

сутствие пирита и других сульфидов в осадочных отложениях над нефтяным месторождением в Луизиане.

В 1912 г. В.И. Вернадский озвучил идею о газовом обмене земной коры. Среди газов земной коры он выделил «газовые испарения» в самостоятельный тип природных газов, поступающих в малых количествах в атмосферу со всей поверхности Земли. Естественно полагать, что на общем фоне поверхностных газовых эксгаляций Земли нефтегазоносные регионы и отдельные участки в их пределах (месторождения) будут отличаться аномально высоким содержанием мигрирующих газов. Эту идею в дальнейшем развил В.А. Соколов, который в 30-х годах 20-го века выдвинул предположение о близвертикальной миграции (диффузии) УВ-соединений в газовом состоянии вместе с сопутствующими им компонентами от ловушки до поверхности Земли и аномальном распределении этих компонентов в поверхностных образованиях (называемое в литературе «углеводородное дыхание недр»). Теоретическая разработка этого положения дала основания для постановки поверхностных газовых съемок.

Потребность в УВ-сырье толкала ученых к новым идеям поисков залежей нефти и к наиболее тщательному изучению системы нефтеобразования и геологической обстановки вокруг месторождений, а также вторичных изменений, связанных с деятельностью залежи. Так, F. Reeves в 1922 г. обнаружил изменение окраски коричнево-красных пермских песчаников на желтую и светло-серую, а также в породах наблюдалось появление карбонатного цемента над нефтяной залежью Cement Field (Оклахома). Похожие изменения в цвете пород над залежами и вне их – при поисках углеводородов на Апшеронском полуострове в начале 20-х годов.

По результатам этих открытий и выдвинутых теорий ученые сделали вывод, что при применении геохимических методов поисков месторождений углеводородов целесообразно отталкиваться от факта существования влияний нефтяной или газовой залежи на верхнюю часть разреза (ВЧР). Влияние осуществляется путем миграции УВ от более глубоких нефтегазовых залежей в близвертикальном направлении, под действием которых образуется неравномерное распределение углеводородных соединений на различных уровнях геологического разреза над скоплениями нефти и газа и, как следствие, возможные эпигенетические новообразования в зонах повышенной миграции УВ-соединений.

В бывшем СССР первые опытно-методические газогеохимические поиски нефти и газа применили в 1932–1933 гг. в районах Северного Кавказа и Нижнем Поволжье [1]. Объектом работ являлись поверхностные образования Мельниковского газового месторождения. Полученный материал показал почти полное отсутствие метана в пробах надпочвенного воздуха и присутствие в них тяжелой фракции, которую в то время по ошибке считали суммой тяжелых углеводородов. Годом позже Я.С. Эвентов провел газовую съемку в районе соляного купола «Солёное Займище», по результатам которой была зафиксирована контрастная аномалия концентраций тяжелой фракции. Аналогичные результаты были получены в 1935–1938 гг. Ю.М. Юровским, А.И. Кутуковым и др. в соляно-купольных районах Нижнего Поволжья. Это были первые аналитические подтверждения аномального распределения тяжелых фракций УВ над залежами нефти и газа, которые дали основу для дальнейшего использования данного метода и изучения распределений миграционных форм УВ над углеводородными залежами, а также предпосылки изучения влияния углеводородов на вторичное минералообразование.

В то же время стали изучать роль бактерий в распределении геохимических аномалий и концентраций отдельных химических элементов при помощи микробиологического метода, предложеного Г.А. Могилевским в 1937 г. Данный метод основан на изучении распределения видов бактериального биоценоза почвы и подпочвы, развивающегося

за счет потребления углеводородных газов, мигрирующих из залежей.

Вплоть до 1940 г. подобные работы носили рекогносцировочный характер из-за ряда недостатков и несовершенства методов и аппаратуры. С 1941 г. начинают систематически проводиться геохимические исследования в Нижнем Поволжье. Основное место занимали газовая съемка, а несколько позже и газокерновая съемка. Оба метода основаны на анализе надпочвенного воздуха и сорбированного породой (керном) газа с глубины 1,5–3,0 метра. Эти съемки проводились Л.А. Кузнецовым, А.М. Прониной Е.М. Геллером и многими другими исследователями.

С середины 40-х годов комплекс геохимических методов поисков УВ-залежей значительно расширился. В практику геохимических работ внедряется битумная, люминесцентно-битумная, микробиологическая, солевая, водно-газовая съемки. Почвенно-битумная и люминесцентно-битумная съемки были проведены на 20 площадях, но на многих из них четких аномалий не выявили.

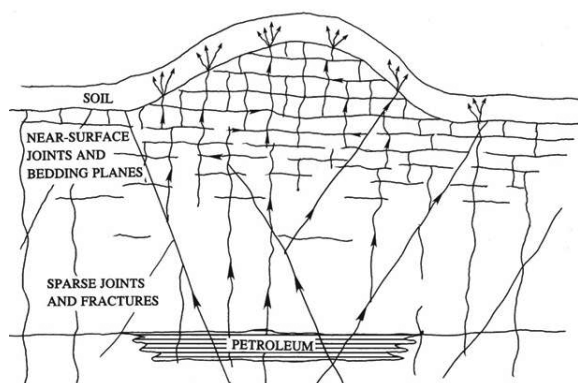
В 50–60-е гг. стали широко применяться радиометрические методы для поисков залежей УВ в таких странах, как США, СССР, Франция и Канада. Вообще в 50–70-е гг. заметна тенденция к соперничеству между СССР и США в области геохимии и, в частности, ее применении при поисках таких стратегически важных видов сырья, как нефть и газ. В СССР с середины 50-х гг. помимо наземной радиогеохимии начали проводить аэrorадиогеохимические исследования.

В ходе эволюции геохимических и геофизических методов поисков нефти и газа усложнялась и их классификация. Главным отличием было разделение на прямые и полупрямые методы поисков углеводородов.

Прямые и косвенные геохимические методы поисков нефти и газа, по данным многих исследователей, основываются на миграции УВ-вещества от уровня локализации залежи вертикально вверх и могут мигрировать до поверхности Земли (рис. 1). Существует эмпирически и теоретически обоснованная модель формирования струйных ореолов рассеяния металлов над месторождениями нефти и газа [2].

Прямые геохимические методы поисков нефти и газа нацелены:

- на наличие миграционных УВ, то есть повышенные концентрации предельных УВ и их изомерных соединений (парафины);
- наличие паробразных УВ (пентанов, гексанов и т. д.);
- для нефтяных месторождений в первую очередь на поиск повышенных концентрации ароматических углеводородов, то есть повышенных концентраций тех соединений, которые не могут генерировать в поверхностных условиях и присущи глубинным углеводородным скоплениям.



**Рис. 1.** Возможные пути миграции компонентов из залежи нефти сквозь осадочную толщу по сети разрывных нарушений, «швы» и плоскости напластования (Saunders, 1995).

**Fig. 1.** Possible ways of components migration from oil deposit through the sedimentary sequence on faults, «seams» and bedding plane (Saunders, 1995)

К косвенным признакам нефтегазоносности относятся:

- наличие повышенного количества углеводородоокисляющих бактерий в тех или иных аномальных зонах, продуктов преобразования углеводородов под влиянием микробиологических, окислительных, радиоактивных и других процессов (зоны повышенных концентраций  $\text{CO}_2$ , избыточного  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ , He), а также продуктов взаимодействия образованных газов с породами (сера, вторичный пирит и др.);
- аномальные концентрации распределения ряда металлических соединений над залежью и в ее контурной части.

В данной статье акцент сделан на особенности некоторых методов, направленных на изучение эпигенетической трансформации минерального и элементного состава природных сорбентов.

В основном полупрямые геохимические методы нацелены на поиск вторичных эпигенетических преобразований минералов над уровнем залежи, связанных с миграцией углеводородных соединений и сопутствующих компонентов преимущественно в вертикальном направлении по трещинам, разломам, благодаря фильтрации и диффузии в флюидоупорных пластах, и дальнейшим воздействием углеводородных компонентов, продуктов их окисления и бактериального разложения [3, 4].

Эпигенетические новообразования проявляются в минеральной форме, металлоорганических соединений, лигандов и др. Таким образом, полупрямыми геохимическими и геофизическими методами нефтяной и газовой разведки месторождений исследуют эпигенетические и диагенетические изменения осадочных пород, а также перераспределения химических элементов [5–7]. Неравномерное распределение химических элементов в контуре нефтегазоносности и, как следствие, наличие аномальных зон объясняются характерными фи-

зико-химическими условиями среды над уровнем залежи [4, 7–10].

Над залежами, в близповерхностных горизонтах, процессу окисления подвергается чаще всего метан и его газообразные гомологи, но нужно учитывать, что метан образуется в процессе жизнедеятельности некоторых микроорганизмов и вырабатывается рассеянным органическим веществом и углями на ранних этапах литогенеза. В наибольших количествах, в результате окисления метана, образуются углекислый газ и вода. В зоне контактов ГВК и ВНК, в областях повышенной проницаемости, фильтрационные процессы транспортировки углеводородов наиболее активны. Внедрение легучих УВ-соединений с уровня залежи в вышележащие породы устанавливает неравновесную систему, в которой до их миграции было установлено относительное равновесие в соотношении количества вещества «сингенетичные газы – органическое вещество – порода». Не растворенные в воде и битумоидах углеводороды на отдельных участках могут накапливаться в больших объемах, создавая аномалии. Другие миграционные УВ в верхней части разреза вступают в химические реакции, что создает аномальные области продуктов изменений УВ.

До поверхности Земли мигрируют более сложные углеводородные компоненты, усиливающие восстановительную обстановку за счет высвобождения при их расщеплении радикала  $(\text{OH})^-$  и образования  $\text{H}_2\text{S}$  в результате восстановления сульфатов десульфидирующими бактериями. Необходимо учитывать, что аномально высокие содержания УВГ в приповерхностных условиях часто имеют сингенетичную природу (ложные аномалии), т. е. формируются за счет перераспределения углеводородов, образованных в тех же отложениях (влияние структурного и литологического факторов). Контрастность подобных аномалий обычно невысокая. Из-за различия миграционного потенциала вмещающих пород над залежью в разных частях проекции наблюдается неравномерное распределение физико-химических условий и, как следствие, отражение их в геохимических и геофизических полях. Также это отражается на кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных параметрах среды, от которых зависят количество и характер эпигенетических новообразований осадочных пород. В многочисленных литературных источниках приводятся данные об аномальных отклонениях pH и Eh, однако на разных месторождениях нефти и газа показатели щелочности, кислотности и окислительно-восстановительного потенциала изменяются по-разному, где-то увеличиваются, а где-то уменьшаются [6, 7, 11–13]. Например, в исследовании, выполненном на нефтяном месторождении Северный Варьеган, в ходе которого изучались степени влияния различных компонентов органического вещества на pH и Eh среды, установлена связь влияния УВГ, зависящая от рас-

стояния до залежи: чем оно меньше, тем меньшими значениями Eh и большими pH характеризуются породы [7]. Направление изменений кислотно-щелочного и окислительно-восстановительного показателя в значительной мере связано с активностью деятельности микроорганизмов, содержанием гумуса и литологических особенностей пород верхней части разреза [10–12, 14]. Однако, по всей видимости, для процессов эпигенетического минералообразования и перераспределения химических элементов в зонах влияния водоуглеродных контактов в первую очередь важно наличие контрастного pH-Eh-градиента [11].

Кроме того, в результате процессов изменений геохимических условий среды и биохимической деятельности микроорганизмов над зонами УВ-залежей происходит вторичная карбонатизация, окремнение, глинизация и сульфидизация над нефтяными объектами [3, 6, 7, 11, 14–17]. Деятельность дальнейших метасоматических реакций также влияет на перераспределение химических элементов в среде.

Одним из косвенных признаков нефтегазоносности являются аномально высокие концентрации тяжелых металлов в зоне «столба» измененных пород над залежью. Такие концентрации распределены близвертикально вытянуто («струйные ореолы рассеяния»). Сейчас некоторые исследователи склоняются к тому, что нефтяная залежь является источником подвижных форм тяжелых металлов [2]. Эмпирическим путем установлено, что металлоорганические соединения обладают способностью к миграции на нефтегазовых месторождениях.

В 1963 г. Д.С. Коробов провел исследования содержания рассеянных элементов в водах, по результатам которых отметил повышенные содержания Mg, Sr, Ba и незначительные увеличения концентраций нескольких других металлов. Однако не установлено, накапливаются ли металлы в нефтяных водах за счет миграции из нефти или они поступают из вмещающих пород или других источников [18].

Одни из первых исследований, связанных с распределением тяжелых металлов (стоит отметить, что исследование было связано только с концентрациями ртути) над углеводородными залежами, в СССР провели в 1981 году. Ученые во главе с Н.А. Озеровой исследовали ртутоносность углеводородных газов и обнаружили повышенные содержания ртути в газах над газовыми и газо-нефтяными месторождениями [19].

В 1988 г. по результатам исследования содержания ртути над нефтяными месторождениями Удмуртской группой ученых во главе с А.П. Инговатовым выявили кольцеобразные аномалии концентрации ртути, чередующиеся повышенным или пониженным количеством относительно его кларка [20].

В том же 1988 г. опубликована статья Р.П. Готтих по исследованию битумов Сибирской платфор-

мы, где наличие металлов было обнаружено при анализе битумоидных вытяжек. А уже в 2012 г. Римма Павловна, проведя исследования по изучению состава нефти и обнаружив в ней значительное присутствие металлов, особенно тяжелых металлов в УВ-соединениях, связывает это явление с эндогенными процессами, принимающими участие в нефтегазообразовании [21].

В последнее время в поисковой геохимии отмечается тенденция изучения наноразмерных высокомиграционных химических элементов. При прогнозах нефтеносности и металлоносности высокую эффективность показали электрохимические методы, основанные на теории струйного рассеяния химических элементов: метод диффузионного извлечения элементов, метод ионно-парообразных форм, метод поисков по металлоорганическим соединениям элементов в почвах, термомагнитный геохимический метод, метод диффузионного извлечения элементов, метод частичного извлечения металлов.

На сегодняшний день применяют несколько методов изучения минерального состава: оптический, электронно-микроскопический, физический, химический, физико-химический и изотопно-геохимический (радиологический).

Подвижные миграционные минеральные формы имеют микроскопические размеры, поэтому изучение распределения наноразмерных химических веществ представляется наиболее интересным.

Первыми исследователями, активно начавшими изучать миграционные формы элементов в наноразмерном состоянии в составе «геогаза», были шведские ученые К. Kristiansson и L. Malmqvist, исследовавшие концентрации металлов над медно-цинковыми месторождениями, концентрации измерялись методом РИХЕ-анализа [22]. Для сбора вещества применялись полистироловые мембраны, помещенные на носики воронок. Каждая воронка устанавливалась в перевернутом виде под землей на глубине 50 см и закапывалась. Такая экспозиция стояла от 22 до 91 дня (в зависимости от эксперимента), а затем мембраны извлекались и анализировались методом РИХЕ. В этом виде анализа мембрана подвергается бомбардировке протонов, имеющих энергию 2,55 МэВ. Энергия протонов достаточна для возбуждения внутренних электронных оболочек собранного вещества. В результате воздействия протонов испускаются характерные рентгеновские лучи, а далее уже регистрируется непосредственно сам рентгеновский спектр. Эксперименты показали значительные превышения концентраций Cu, Zn, As, Pb над объектами исследования. Над одним из объектов были получены повышенные значения Ga, в самом рудном теле также отмечается обилие этого элемента. Также исследователи получили любопытные превышения концентраций хлора и серы в одном из экспериментов, первый зачастую участвует в процессах минерализации. Эти же ученые в Швеции провели

эксперименты по изучению концентраций рассеянных металлов над золоторудными объектами, используя подобную систему сбора вещества [23].

Также повышенные концентрации металлов в снежном покрове над УВЗ и рудными месторождениями были установлены в России и Швеции [23, 24]. Снег, как и грунтовые воды, оказался хорошим природным сорбентом, способным захватывать не только тяжелые углеводороды, но и металлические наночастицы, переносимые микропырьковым газом из глубин земной коры.

Исследования почвенной атмосферы также выявили повышенные концентрации миграционных форм металлов над золотоносными объектами в Китае и Узбекистане, а также на нефтяном месторождении в России [25, 26].

В России активно используется метод анализа сверхтонкой фракции (МАСФ), который известен уже более 10 лет [27]. Результаты данных работ были подтверждены последующими геолого-разведочными работами.

В литературных источниках приводятся примеры возникновения аномалий концентраций в ВЧР над УВ-залежами следующих элементов: Ca, Mg, Na, Al, Fe, Mn, Si, V, Cr, Ni, Co, Zn, Cu, Mo, Pb, Ti, Hg, Sr, Ba, Cl, Br, J, As, Cd, Se, Ba, Ce [28].

Главным сдерживающим фактором использования нефтепоисковых методов, основанных на изучении минерального и элементного состава приповерхностных образований, является полигенность выделяемых аномалий. Возникает сложная задача выделения аномалий, связанных с процессами эпигенетической миграции вещества от УВЗ, а не с гипергенными процессами в верхней части разреза, и изучение распределения концентраций веществ недостаточно для стопроцентной уверенности о генезисе найденного вещества, так как методами количественной оценки вещества мы не можем устанавливать форму нахождения исследуемых элементов. Стоит проблема нахождения форм переноса металлов. Для их определения необходим качественный подход исследования каждой найденной частицы, размеры которых могут варьироваться от первых нанометров до нескольких микрометров. Такие небольшие формы можно исследовать на современных просвечивающих электронных микроскопах.

#### Применение просвечивающей электронной микроскопии при поисках нефти и газа

Развитие методов электронной микроскопии позволило исследовать разнообразные формы нахождения химических элементов в наноразмерном состоянии. Применительно к вопросу миграции химических элементов в составе водогазовых потоков интересна методика сбора и изучения наноразмерных минеральных форм, реализованная над погребенными свинцово-цинковыми оруденениями в Китае [29]. Для сбора вещества, находящегося

в почвенной атмосфере, использовались специальные коллекторы, являющиеся модификацией устройств, предложенных шведскими учеными [23, 26]. Главным отличием данного исследования являлось осаждение наноразмерных частиц на специальных сеточках и их изучение при помощи просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Это позволило установить минеральные формы наночастицы, которые по своему химическому составу были одинаковы с минеральным составом рудного тела, что напрямую доказывает миграцию наночастиц с геогазом с различных глубин вплоть до дневной поверхности. По результатам этих исследований удалось зафиксировать над рудными телами различные минеральные формы Pb и Cu размерностью от 10 до 300 нанометров и с хорошей корреляцией по генезису с рудным телом.

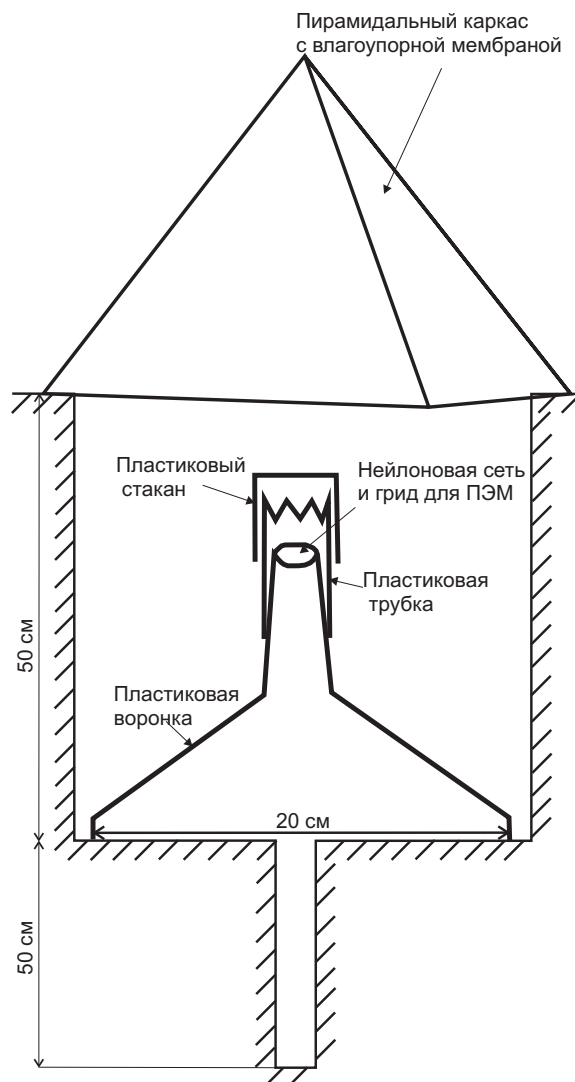


Рис. 2. Метод сбора наночастиц на искусственную аккумулятивную систему

Fig. 2. Method of collecting nanoscale particles on artificial accumulative system



Исходя из этого, нами предложено использовать способ изучения наноразмерных соединений химических элементов в приповерхностных образованиях, которые предположительно мигрируют в составе парогазового потока с уровня УВЗ. Но данный метод исследования достаточно дорогой, поэтому целесообразней использовать его после литохимической съемки в пределах выявленных аномалий для установления их связи с процессами миграции элементов в составе геогаза. Метод отбора наночастиц предлагается применить такой же, что и применяли X. Wei и др. [30], но с небольшими доработками и изменениями.

По нашему мнению, для аккумуляции наночастиц целесообразно применять сеточку для ПЭМ типа G220A, она изготовлена из золота. Материал выбран именно этот, потому что над УВЗ не ожидается появление соединений, в состав которых бы входило золото и могло бы оказать мешающее воздействие на аналитическую часть эксперимента. Сеточка устанавливается между двумя нейлоновыми мембранами, закрепленными на конце воронки. Сама воронка в перевернутом положении помещается в ямку глубиной 50 см, в шпуре пробурен дополнительный подводящий канал с меньшим диаметром. Сверху шпур следует прикрыть пирамидальной конструкцией с натянутой на ней мембраной, предотвращающей попадание атмосферных осадков с внешней стороны, а с внутренней стороны мембрана позволяет циркулировать воздуху (рис. 2). X. Wei и др. данную экспозицию рекомендуют проводить в течение 30–40 дней, что

также будет достаточно для нашего эксперимента. По истечении данного срока всю эту конструкцию следует вынуть из шпура, а сеточки для ПЭМ поместить в специальный стерильный контейнер для безопасной транспортировки. После этого сеточки исследуют на ПЭМ.

#### Заключение

Существуют научные доказательства миграции УВ-соединений от уровня залежи до дневной поверхности, также установлена деятельность УВ-соединений в окислительно-восстановительных реакциях вдоль всего разреза над залежью. Как результат, трансформация минералого-геохимического состава пород, возникновение высокоподвижных неорганических и органических соединений металлов, способных мигрировать до дневной поверхности. Предложенный нами метод может экспериментально доказать эти процессы, установить минеральную форму нахождения мигрирующих в парогазовом потоке металлов, а также позволит получить важную информацию о механизмах возникновения геохимических аномалий над скоплениями углеводородов.

Эта методика имеет потенциал повысить качество проведения геолого-разведочных работ, направленных на поиск нефти и газа. Поможет рационально использовать трудовые и финансовые ресурсы. Необходимо продолжать разрабатывать, улучшать и внедрять новые прямые и косвенные геохимические методы поисков углеводородов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов В.А. Итоги опытных работ по газовой съемке // Нефтяное хозяйство. – 1935. – № 5. – С. 28–35.
2. Струйные ореолы рассеяния тяжелых металлов нефтегазовых месторождений и их использование при оценке параметров залежей / О.Ф. Путиков, С.А. Вешев, Н.А. Ворошилов и др. // Доклады РАН. – 2000. – Т. 370. – № 5. – С. 668–671.
3. Ye R., Zhang B., Wang Y. Mechanism of the migration of gold in desert regolith cover over a concealed gold deposit // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2015. – V. 15. – № 1. – P. 62–71.
4. Groth P.K., Groth L.W. Bibliography for surface and near-surface hydrocarbon prospecting methods. – Denver: Groth Geochemistry Services (for the Association of Petroleum Geochemical Explorationists), 1994. – 143 p.
5. Geochemical assessment of hydrocarbon migration phenomena: Case studies from the south-western margin of the Dead Sea Basin / E. Sokol et al. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2014. – V. 93. – P. 211–228.
6. Литогеохимические исследования при поисках месторождений нефти и газа / под ред. О.Л. Кузнецова. – М.: Недра, 1987. – 184 с.
7. Физико-химические основы прямых поисков залежей нефти и газа / под ред. Е.В. Каруса. – М.: Недра, 1986. – 336 с.
8. Schumacher D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments / Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams // *Hydrocarbon migration and its near surface expression. The American Association of Petroleum Geologists Memoir*. – 1996. – V. 66. – P. 71–89.
9. Saunders D.F., Burson K.R., Tompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations // *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1999. – V. 83. – № 1. – P. 170–185.
10. Sikka D.B., Shives R.B.K. Radiometric surveys of the Redwater oil field, Alberta: Early surface exploration case histories suggest mechanisms for the development of hydrocarbon related geochemical anomalies, in *Surface exploration case histories / Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing* / Eds. D. Schumacher, L.A. LeSchack // *The American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology* № 48 and *SEG Geophysical References Series*. – 2002. – № 11. – P. 243–297.
11. Процессы формирования аномальных литогеохимических эффектов над месторождениями углеводородов / А.В. Петухов, Т.И. Дорогокупец, О.В. Зверева, И.С. Капина. – М.: ВНИИгеоинформсистем, 1988. – 24 с.
12. Якимов А.С., Швыдкий Э.К., Вассерман В.А. Новые представления о формировании естественных электрических полей углеводородных залежей // *Геология нефти и газа*. – 2007. – № 1. – С. 39–45.
13. Pirson S.J. Oil is confined in the Earth by redox potential barriers // *Oil and Gas Journal*. – 1980. – V. 76. – № 27. – P. 152–161.
14. Рязанова М.С., Мартынова М.А., Хаустов В.В. Метод биогеохимической индикации и его использование при поисках углеводородов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Техника и Технологии»*. – 2014. – № 2. – С. 80–90.
15. Малюшко Л.Д., Коробов Ю.И. Метод ДГМ (диагностики генезиса минералов) – эффективный физико-химический способ

- локального прогноза залежей УВ при прямых поисках нефти и газа // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 7. – С. 45–50.
16. Khan S.D., Jacobson S. Remote sensing and geochemistry for detecting hydrocarbon microseepages // Geological Society of America Bulletin. – 2008. – V. 120. – № 1/2. – P. 96–105.
17. Petrovic A., Khan S.D., Thurmond A.K. Integrated hyperspectral remote sensing, geochemical and isotopic studies for understanding hydrocarbon-induced rock alterations // Marine and Petroleum Geology. – 2012. – V. 35. – P. 292–308.
18. Коробов Д.С. Распределение рассеянных элементов в водах и породах нефтяных месторождений Саратовско-Волгоградского Поволжья и их значение для поисков нефти // Ядерная геофизика. – 1963. – С. 222.
19. Ртуноносность углеводородных газов / Н.А. Озерова, Ю.И. Пиковский, М.В. Багдасарова, М.А. Груздева // Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества докембрия. – М.: Наука, 1981. – С. 59–65.
20. Игнатов А.П., Бровчук И.Ф., Бородин В.А. Ртуть – индикатор углеводородов при геохимических поисках нефти и газа // Доклады АН СССР. – 1989. – Т. 306. – № 2. – С. 443–447.
21. Глубинные структурно-тектонические неоднородности земной коры и возможные процессы, связанные с нефтегазообразованием и нефтегазоаккумуляцией (геохимический аспект) / Р.П. Готтих, Б.И. Писоцкий, В.И. Галуев, С.А. Каплан // Отечественная геология. – 2012. – № 2. – С. 3–14.
22. Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition // Geoexploration. – 1987. – V. 24. – № 6. – P. 517–534.
23. Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations // Endeavour. – 1990. – V. 14. – № 1. – P. 28–33.
24. Соболев И.С. О возможности изучения элементного состава снегового покрова при геохимическом картировании зон и областей внедрения глубинных флюидов (нефтегазопоисковый аспект) // Геология нефти и газа. – 2013. – № 1. – С. 68–77.
25. Nanoscale metals in Earth gas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains / X. Wang et al. // Journal of Geochemical Exploration. – 1997. – V. 58. – № 1. – С. 63–72.
26. Бредихин Н.П. Особенности распределения химических элементов в подпочвенной атмосфере на Верх-Тарском нефтяном месторождении (Новосибирская область) // Проблемы геологии и освоения недр: материалы XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 218.
27. Соколов С.В., Володько С.А., Юрченко Ю.Ю. Методические основы инновационной технологии прогнозной оценки закрытых территорий по комплексу дистанционных и наземных геохимических методов // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 6. – С. 30–37.
28. Особенности обработки и интерпретации магниторазведочных и литохимических данных при поисках месторождений нефти и газа в условиях Сибирской платформы (на примере Имбинской газоносной площади) / И.С. Соболев, Н.П. Бредихин, В.П. Меркулов, А.Н. Орехов // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 6–18.
29. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead–zinc deposit, Guangdong Province, South China / X. Wei, J. Cao, R.F. Holub, P.K. Hopke, Sh. Zhao // Journal of Geochemical Exploration. – 2013. – V. 128. – P. 124–135.

Поступила 30.03.2016 г.

#### Информация об авторах

**Бредихин Н.П.**, аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Соболев И.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.84.094.2

## PREREQUISITE TO APPLYING TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPE AS A GEOCHEMICAL METHOD FOR DETECTING MIGRATION FORMS OF MINERALS OVER HYDROCARBON DEPOSITS

Nikolay P. Bredikhin<sup>1</sup>,  
bnp1991@mail.ru

Igor S. Sobolev<sup>1</sup>,  
geolsob@yandex.ru

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

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to develop the technique for finding and identifying metal compounds migration forms over the boundaries of hydrocarbon deposits on the Earth surface. The existing information on possibility of metal transfer from the level of deposits is often contradictory and it can cast doubt on the possibility of geochemical prospecting of hydrocarbon deposits on the basis of information on metal content in the subsurface horizons. The technique of collection and analysis allows us to study nanoscale metal compounds migrating as a part of gas flow to the Earth surface. It becomes possible to determine the origin of nanoscale metal compounds with the ability to prove the genesis of the deep nature of the substance found on the surface.

**The main aim** of the research is to review and to analyze the existing knowledge on geochemical methods of prospecting for oil and gas; to model a new geochemical method associated with the study of samples on a transmission electron microscope for identifying nanoscale particles.

**The methods used in the study:** geochemistry methods of prospecting and exploration of oil and gas fields, transmission electron microscopy.

**The results of the research.** The authors have reviewed and analyzed the literature on geochemical methods to search for oil and gas deposits and analyzed the patterns of geochemical features and magnetic fields on deposits of the West Siberian oil and gas province. The paper introduces a new prospecting and exploration geochemical and magnetic technique which can help identify nanoscale mineral forms of chemical elements with a transmission electron microscope, in particular find and identify migration metal compounds.

### Key words:

Hydrocarbon deposits, geogas migration flow, geochemistry, transmission electron microscopy, nanoparticles, epigenetic changes, migration forms of metals.

### REFERENES

- Sokolov V.A. The results of the experimental work on gas survey. *Oil Industry*, 1935, no. 2, pp. 28–35. In Rus.
- Putikov O.F., Veshev S.A., Voroshilov N.A. Ink halos of dissipation of heavy metals in oil and gas fields and their use when evaluating the reservoir parameters. *Doklady RAN USSR*, 2000, vol. 370, no. 5, pp. 668–671. In Rus.
- Ye R., Zhang B., Wang Y. Mechanism of the migration of gold in desert regolith cover over a concealed gold deposit. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 62–71.
- Groth P.K., Groth L.W. *Bibliography for surface and near-surface hydrocarbon prospecting methods*. Denver, Groth Geochemistry Services (for the Association of Petroleum Geochemical Explorationists), 1994. 143 p.
- Sokol E. Geochemical assessment of hydrocarbon migration phenomena: Case studies from the south-western margin of the Dead Sea Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, vol. 93, pp. 211–228.
- Litogeokhimicheskie issledovaniya pri poiskakh mestorozhdeniy nefti i gaza* [Lithochemical exploration when searching for oil and gas]. Ed. by O.L. Kuznetsov. Moscow, Nedra Publ., 1987. 184 p.
- Fiziko-khimicheskie osnovy pryamykh poiskov zalezhey nefti i gaza [Physical-chemical basis of direct exploration of oil and gas]. Ed. by E.V. Karus. Moscow, Nedra Publ., 1986. 336 p.
- Schumacher D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams. *Hydrocarbon migration and its near surface expression: the American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1996, vol. 66, pp. 71–89.
- Saunders D.F., Burson K.R., Tompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1999, vol. 83, no. 1, pp. 170–185.
- Sikka D.B., Shives R.B.K. Radiometric surveys of the Redwater oil field, Alberta: Early surface exploration case histories suggest mechanisms for the development of hydrocarbon related geochemical anomalies, in Surface exploration case histories. Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing. Eds. D. Schumacher, L.A. Le Schack. *The American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology no. 48 and SEG Geophysical References Series no. 11*, 2002, pp. 243–297.
- Petukhov A.V., Dorogokupets T.I., Zvereva O.V., Kapina I.S. *Protssessy formirovaniya anomalnykh litogeokhimicheskikh effektov nad mestorozhdeniyami uglevodorodov* [Formation of anomalous lithochemical effects above hydrocarbon deposits]. Moscow, VNIIGeoinformsistem Publ., 1988. 24 p.
- Yakimov A.S., Shvydkin E.K., Vasserman V.A. New ideas on formation of natural electric fields of hydrocarbon deposits. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, no. 1, pp. 39–45. In Rus.
- Pirson S.J. Oil is confined in the Earth by redox potential barriers. *Oil and Gas Journal*, 1980, vol. 76, no. 27, pp. 152–161.
- Ryazanova M.S., Martynova M.A., Khaustov V.V. Biogeochemical indication method and its use when searching for hydrocarbons. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i Tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 80–90. In Rus.
- Malyushko L.D., Korobov Yu.I. Metod DGM (diagnostiki genezisa mineralov) – effektivny fiziko-khimicheskiy sposob lokalnogo prognoza zalezhey UV pri pryamykh poiskakh nefti i gaza [DGM method (diagnostic genesis of minerals) is the effective physico-

- chemical method of local forecast of hydrocarbon deposits in direct search for oil and gas]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2006, no. 7, pp. 45–50.
16. Khan S.D., Jacobson S. Remote sensing and geochemistry for detecting hydrocarbon microseepages. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, vol. 120, no. 1/2, pp. 96–105.
  17. Petrovic A., Khan S.D., Thurmond A.K. Integrated hyperspectral remote sensing, geochemical and isotopic studies for understanding hydrocarbon-induced rock alterations. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, vol. 35, pp. 292–308.
  18. Korobov D.S. Raspređenje rasseyanykh elementov v vodakh i porodakh neftyanykh mestorozhdeniy Saratovsko-Volgogradskogo povolzhya i ikh znachenie dlya poiskov nefiti [Distribution of trace elements in waters and rocks of oil fields of Saratov-Volgograd Volga region and their implications for oil exploration]. *Yadernaya geofizika*, 1963, pp. 222.
  19. Ozerova N.A., Pikovskiy Yu.I., Bagdasarova M.V., Gruzdeva M.A. Rtutnostnouglevodorodnykh gazov [Mercury content of hydrocarbon gas]. *Organicheskaya geokhimiya neftey, gazov i organicheskogo veshstva dokembriya* [Organic geochemistry of oil, gas and organic matter Precambrian]. Moscow, Nauka, 1981. pp. 59–65.
  20. Ignatov A.P., Borovchuk I.F., Borodin V.A. Rtut – indikator uglevodorodov pri geokhicheskikh poiskakh nefiti i gaza [Mercury is an indicator of hydrocarbons in geochemical prospecting of oil and gas]. *Doklady AN USSR*, 1989, vol. 306, no. 2, pp. 443–447.
  21. Gottikh R.P., Pisockiy B.I., Galuev V.I., Kaplan S.A. Deep structural-tectonic inhomogeneity of the crust and possible processes associated with oil and gas generation and oil and gas accumulation (geochemical aspect). *Otechestvennaya geologiya*, 2012, no. 2, pp. 3–14. In Rus.
  22. Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition. *Geoexploration*, 1987, vol. 24, no. 6, pp. 517–534.
  23. Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavour*, 1990, vol. 14, no. 1, pp. 28–33.
  24. Sobolev I.S. On possibility of studying the elemental composition of snow cover for geochemical mapping of zones and areas of implementation of deep fluids (oil and gas exploration aspect). *Russian Geology and Geophysics*, 2013, no. 1, pp. 68–77. In Rus.
  25. Wang X. Nanoscale metals in Earth gas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, vol. 58, no. 1, pp. 63–72.
  26. Bredikhin N.P. Osobennosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v podpochvennoy atmosfere na Verkh-Tarskom neftyanom mestorozhdenii (Novosibirskaya oblast) [Features of distribution of chemical elements in subsoil atmosphere at Verkh-Tarskoe oil field (Novosibirsk region)]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: materialy XIX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova* [Problems of geology and mineral resources development. Proc. of the XIX International symposium named after academician M.A. Usov]. Tomsk, TPU Publ. house, 2015. pp. 218.
  27. Sokolov S.V., Volodko S.A., Yurchenko Yu.Yu. Methodical bases of innovative technology of forecast evaluation of closed areas for complex remote and ground geochemical methods. *Prospect and protection of mineral resources*, 2015, no. 6, pp. 30–37. In Rus.
  28. Sobolev I.S., Bredikhin N.P., Merkulov V.P., Orekhov A.N. Features of processing and interpretation of magnetic and lithochemical data while exploring oil and gas fields in Siberian platform conditions (by the example of Imbinskaya gas-bearing area). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 6–18. In Rus.
  29. Wei X., Cao J., Holub R.F., Hopke P.K., Zhao Sh. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead–zinc deposit, Guangdong Province, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, vol. 128, pp. 124–135.

Received: 30 March 2016.

#### Information about the authors

**Nikolay P. Bredikhin**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Igor S. Sobolev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.314

## ХИМИЧЕСКИЙ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЮЖНЫХ И ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАЙОНОВ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

**Лепокурова Олеся Евгеньевна<sup>1,2</sup>,**  
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

**Иванова Ирина Сергеевна<sup>2,3</sup>,**  
IvanovaIS\_1986@mail.ru

**Шварцев Степан Львович<sup>1,2</sup>,**  
tomsk@ipgg.sbras.ru

**Колубаева Юлия Викторовна<sup>1</sup>,**  
kolubaeva@inbox.ru

**Наливайко Нина Григорьевна<sup>2</sup>,**  
biologistnqn@yandex.ru

<sup>1</sup> Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4

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

<sup>3</sup> Институт экологических проблем Севера УрО РАН,  
Россия, 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 23

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью оценки качества питьевых вод, потребляемых населением, в условиях децентрализованного водоснабжения.

**Цель работы** заключается в изучении химического и микробиологического состава подземных вод, формирующихся в естественных природных условиях.

**Методы исследования.** Химический и микробиологический состав вод исследовались в Проблемной научно-исследовательской гидрогеохимической лаборатории (ТПУ), зарегистрированной в Системе аналитических лабораторий Госстандарта России. Для проведения полного химического анализа использовались традиционные методы. Микробиологический анализ производили после отбора проб, как правило, в течение суток, при этом пробы хранились в сумке-холодильнике. Для выявления микроорганизмов использовали жидкие и твердые селективные питательные среды. Микрокомпонентный состав определялся при помощи масс-спектрометрического метода с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе Elan 6000 (Perkin Elmer) в лаборатории георесурсов и окружающей среды г. Тулузы (Национальный центр научных исследований, Франция).

**Результаты.** Данные химического и микробиологического состава питьевых подземных вод четвертичных, неогеновых, палеогеновых и меловых отложений показали, что воды являются в эпидемиологическом отношении безопасными (кишечная палочка не обнаружена), в то время как по химическому составу они чаще всего непригодны для питьевого водоснабжения по таким компонентам, как Fe, Mn,  $C_{org}$ , Si, частично OЖ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$ , из микрокомпонентов – Ba, редко В и Li. Превышения эти отражают естественный природный фон территории и характерны для всего региона. Микрофлора отражает геохимическую среду, богатую органикой, но обедненную минеральными веществами.

### **Ключевые слова:**

Питьевые подземные воды, децентрализованное водоснабжение, Томская область, химический и микробиологический состав, микроэлементы.

### **Введение**

Изучением состояния подземных вод в естественных условиях централизованного водоснабжения Томской области занимается АО «Томскгеомониторинг» и ежегодно отчитывается в информационных бюллетенях (*последний бюллетень* [1]). Данные воды, при подаче к потребителю, проходят определенную водоподготовку. Однако только 65 % населения Томской области обеспечено доброкачественной питьевой водой. Около 14 % населения Томской области пьет недоброкачественную

питьевую воду и примерно 21 % – условно доброкачественную, поскольку пользуется подземными водами децентрализованных источников водоснабжения без предварительной подготовки. Все это и обуславливает необходимость изучения химического, а также микробиологического состава подземных вод децентрализованного водоснабжения некоторых районов Томской области.

По подземным водам области накоплен, обобщен и проанализирован обширный материал, который освещен в статьях, научных отчетах, моно-

графиях и диссертациях множества исследователей, среди которых сотрудники ТПУ, ТГУ, ТГАСУ, ТФ ИНГГ СО РАН, ТФ СНИИГиМС и, конечно, АО «Томскгеомониторинг». Первые исследования по питьевым водам региона были обобщены в работе [2]. Благодаря сотрудникам кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ТПУ в 60-е годы прошлого века были дан прогноз наличия Томского месторождения подземных вод, одни из первооткрывателей которого были П.А. Удодов и Н.М. Рассказов. Большая работа была проделана сотрудниками Проблемной гидрогеохимической лаборатории ТПУ. Оценке качества подземных вод Томского месторождения были посвящены работы Н.А. Ермашовой, С.Л. Шварцева, Ю.К. Смоленцева, Г.М. Рогова, А.С. Скогорева, Д.С. Покровского, В.В. Быковой, А.Д. Назарова, Ю.Г. Копыловой, В.К. Попова, В.А. Зуева, Н.Г. Наливайко, О.Г. Савичева, Е.М. Дутовой, Л.С. Маныловой, Н.М. Шварцевой, О.В. Колоколовой и др. Коллективом авторов (Л.В. Сериковым, Л.Н. Шиян, Е.А. Тропиной, Н.В. Видяйкиной) предложены методы улучшения качества питьевых подземных вод. Н.В. Кончаковой проведена санитарно-гигиеническая типизация подземных вод, используемых в питьевых целях в Томской области, и показано их территориальное развитие. Коллективом авторов в составе О.Д. Лукашевич, Е.П. Янкович, Н.А. Осиповой, В.А. Лыготина, К.С. Янкович приводятся результаты оценки риска для здоровья населения, обусловленного потреблением подземной воды без предварительной подготовки. Геоэкологические исследования на этой территории нашли

отражение в работах А.М. Адама, А.В. Вана, А.В. Мананкова, В.Е. Ольховатенко, В.П. Парначева, Л.П. Рихванова, Н.А. Рослякова, Е.Г. Язикова, Е.Ю. Пасечник и других авторов. Из-за большого числа работ мы ссылаемся лишь на некоторые из самых значимых последних публикаций [3–11].

Авторами данной работы в ходе собственных полевых исследований за последние 5 лет был собран достаточно обширный массив гидрогеохимических данных по питьевым скважинам и колодцам децентрализованного водоснабжения. При этом основной объем опробования пришелся на южную и центральную части области, что связано с отсутствием транспортной инфраструктуры в северных районах в летний период. Часть материала уже неоднократно была опубликована в печати [12–16].

Всего было отобрано 128 проб воды из 81 скважины и 4 колодцев, имеющих глубину от 10 до 740 м, в основном до 200 м. Схема расположения точек отбора проб подземных вод представлена на рис. 1. Отбор проб подземных вод производился непосредственно на устье скважин после откачки застоявшейся воды в обсадных трубах. В каждой точке гидрогеохимического опробования *in situ* определялись параметры быстроизменяющихся компонентов, таких как Eh, pH, температура, содержание ионов Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup>. Часть проб фильтровалась при помощи фильтров 0,45 мкм (Millipore Millex-HP) и консервировалась азотной кислотой для более детального изучения в стационарных лабораториях. Химический и микробиологический

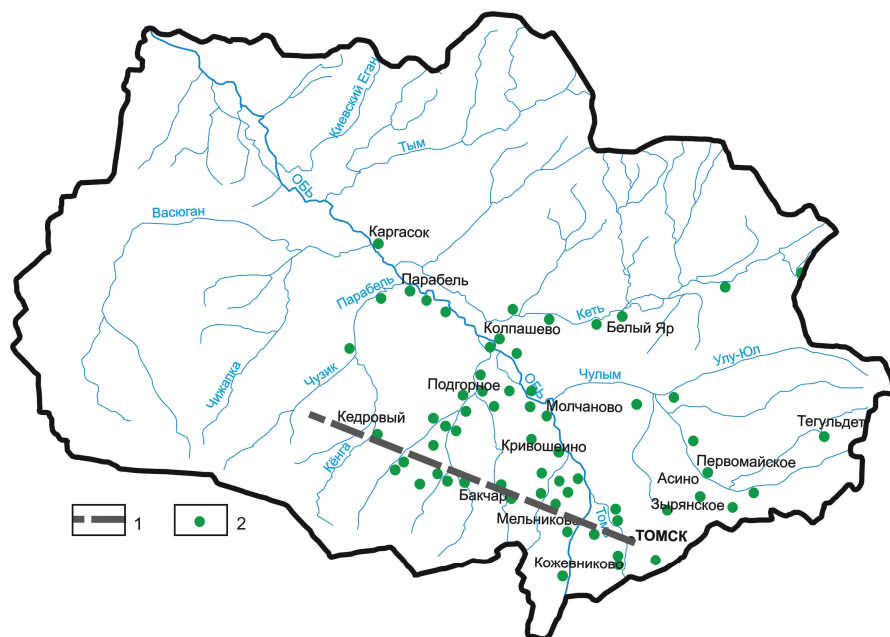
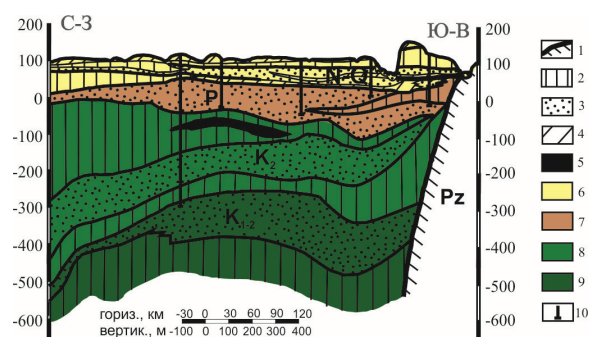


Рис. 1. Схема расположения пунктов опробования подземных вод на территории Томской области: 1 – линия гидрогеохимического разреза; 2 – пункты опробования

Fig. 1. Scheme of arrangement for places of testing groundwater in the territory of Tomsk region: 1 is the line of hydrogeological section; 2 are the testing places

составы вод исследовались в Проблемной научно-исследовательской гидрогеохимической лаборатории (ТПУ), зарегистрированной в Системе аналитических лабораторий Госстандарта России. Для проведения полного химического анализа использовались традиционные методы. Микробиологический анализ производили после отбора проб, как правило, без стадии хранения или в течение суток, при этом пробы хранились в сумке-холодильнике. Для выявления микроорганизмов использовали жидкие и твердые селективные питательные среды. Микрокомпонентный состав определялся при помощи масс-спектрометрического метода с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе Elan 6000 (Perkin Elmer) в лаборатории георесурсов и окружающей среды г. Тулузы (Национальный центр научных исследований, Франция).



**Рис. 2.** Схематический гидрогеохимический профиль. Составлен на основе геологического разреза [17]: 1 – фундамент; 2 – глина; 3 – песок; 4 – суглинок; 5 – железная руда; 6–9 – площади распространения вод с минерализацией (в г/л) различного ионно-солевого состава: 6 – 0,1–0,6 ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  и  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ , pH 6,3–7,2); 7 – 0,2–0,9 ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , pH 6,4–7,5); 8 – 0,4–1,2 ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  и  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ , pH 6,9–8,6); 9 – 1,4–2,7 ( $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$  и  $\text{Cl-Na}$ , pH 7,3–8,3); 10 – скважины

**Fig. 2.** Schematic hydrogeochemical profile, made on the basis of geological section [17]: 1 is the basement; 2 is the clay; 3 is the sand; 4 is the loam; 5 is the iron ore; (6–9) are the areas of distribution of water with mineralization (in g/l) of different salt ion composition: 6 – 0,1–0,6 ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  and  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ , pH 6,3–7,2); 7 – 0,2–0,9 ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , pH 6,4 – 7,5); 8 – 0,4–1,2 ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  and  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ , pH 6,9–8,6); 9 – 1,4–2,7 ( $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$  and  $\text{Cl-Na}$ , pH 7,3–8,3); 10 are the wells

Район исследований представляет равнинную сильно заболоченную территорию, сложенную сверху неоген-четвертичными отложениями мощностью до 100 м (рис. 2). Самый верх разреза этих отложений на большей части территории представлен слоями торфа мощностью до 6–8 м. Ниже неоген-четвертичных отложений залегают песчано-глинистые осадки палеогена мощностью 200–400 м, подстилаемые, в свою очередь, отложениями верхнего мела мощностью до 600 м. В пределах этой толщи развиты два водоносных комплекса: эоцен-четвертичный и эоцен-верхнемеловой, разделенные на большей части территории

мощным водоупором, представленным эоценовыми глинами. Каждый водоносный комплекс делится на несколько горизонтов, важнейшими среди которых являются неоген-четвертичный, палеогеновый и верхнемеловой. Все, кроме первого водоносного горизонта, содержат напорные воды.

#### Химический состав питьевых подземных вод

*Подземные воды неоген-четвертичных отложений.* Всего отобрана 21 проба на глубинах от 10 до 30 м в колодцах и частных скважинах. Из-за большого объема фактического материала в табл. 1 приведены лишь типичные химические анализы питьевых вод. По основным физико-химическим свойствам подземные воды являются пресными (минерализация в основном от 130 до 570 мг/л, за редким исключением, о котором речь пойдет ниже), гидрокарбонатными, преимущественно кальциевыми или кальциево-магниевыми, слабощелочными и околонеутральными (6,3–7,2). Ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  имеют сугубо подчиненное значение в составе солей.

Содержания  $\text{C}_{\text{орг}}$  в исследуемых водах изменяются в диапазоне от 1,0 до 16 мг/л и в среднем составляют 5,1 мг/л. Они представлены в основном веществами гумусового ряда (фульво- и гуминовыми кислотами). Содержание Si варьируют в широком пределе от 2 мг/л до 16 мг/л, как и величина общей жесткости (ОЖ) – от 1 до 7 мг-экв/л.

Все отобранные воды неоген-четвертичных отложений обогащены Fe, максимальное содержание которого 15,5 мг/л (по другим данным до 30–40 мг/л [18], что превышает предельно допустимые концентрации для хозяйственно-питьевых целей ( $\text{ПДК}_{\text{хл}}=0,3$  мг/л) [19] примерно в 50 раз. Средняя концентрация железа составляет 6,7 мг/л, что примерно в 25 раз превышает  $\text{ПДК}_{\text{хл}}$ .

Благодаря сходным химическим свойствам Mn, как и Fe, весьма распространен в подземных водах. Максимальное содержание достигает 1,6 мг/л, что в 16 раз превышает  $\text{ПДК}_{\text{хл}}$  (0,1). Средняя концентрация составляет 0,4 мг/л, что в 3 раза превышает  $\text{ПДК}_{\text{хл}}$ .

Описанные выше превышения отражают естественный природный фон территории и характерны для всего региона.

На общем фоне подземных вод, формирующихся в естественных условиях, выделяются явно *техногенно-трансформированные* подземные воды [20], имеющие минерализацию 0,6–1,0 и более г/л (в табл. 1 выделены курсивом). Всего встречено 4 пробы таких вод в двух частных скважинах села Инкино и в колодцах деревень Нельмач и Новоюгино (Каргасокский и Парабельский районы). В водах наблюдается одновременное присутствие целого ряда макрокомпонентов с повышенными и даже очень высокими концентрациями. В анионно-катионном составе подземных вод преобладают ионы  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , но по сравнению с теми водами, которые формируются в естественных природных

**Таблица 1.** Химический состав некоторых питьевых подземных вод децентрализованного водоснабжения, мг/л

**Table 1.** Chemical composition of some drinking groundwater of the decentralized water supply, ppm

№	Населенный пункт Place	Н* м/м	рН	Σ*	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	Mn	Si	C <sub>орг</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
<b>Воды неоген-четвертичных отложений/Water of the Neogene-Quaternary sediments</b>																			
1	Кенга/Kenga	23	7,2	410	305	2,1	2	82	11	7	0,9	<b>6,0</b>	<b>0,42</b>	8,3	2,8	2,5	0,005	1,4	0,18
2	Белояровка/Beloyarovka	20	7,1	393	293	1,2	1	76	13	9	1,0	<b>9,4</b>	<b>0,18</b>	<b>12,5</b>	2,7	0,8	0,003	0,5	0,20
3	Юдино/Yudino	20	6,7	228	171	4,2	1	38	8	7	1,2	<b>9,8</b>	<b>0,18</b>	<b>15,6</b>	3,8	1,1	0,003	0,5	0,55
4	Палочка/Palochka	10	6,8	168	125	5,9	1	22	8	5	0,9	<b>7,4</b>	<b>0,13</b>	<b>13,7</b>	<b>9,6</b>	0,7	0,009	0,2	0,90
15	Улу-Юл/Ulu-Yul	30	6,9	180	122	8,9	6	32	5	6	1,0	<b>4,6</b>	<b>0,34</b>	9,5	3,0	0,2	0,008	0,1	0,07
21	Нельмач/Nelmach	14	6,8	381	159	33,1	71	86	12	19	0,7	<b>1,0</b>	<b>0,18</b>	9,0	<b>9,0</b>	0,2	0,080	<b>59,0</b>	0,08
12	Инкино/Inkino	20	7,0	968	335	81,7	215	288	15	30	3,1	<b>8,2</b>	<b>0,33</b>	2,4	<b>7,4</b>	0,7	1,820	<b>230</b>	0,05
17	Инкино/Inkino	24	6,8	<b>1010</b>	402	130	153	280	26	16	3,3	<b>1,6</b>	<b>0,11</b>	2,8	4,8	0,2	0,225	<b>176</b>	0,01
19	Новоюгино/Novoyugino	12	7,1	747	286	133	146	94	<b>69</b>	16	1,5	<b>7,3</b>	<b>0,68</b>	8,7	<b>16,0</b>	0,9	0,020	0,1	0,05
<b>Воды палеогеновых отложений/Water of Paleogene sediments</b>																			
31	Бакчар/Bakchar	51	7,3	527	403	2,6	1	94	16	10	1,2	<b>4,1</b>	<b>0,49</b>	8,1	2,8	1,4	0,003	1,8	0,29
36	Гореловка/Gorelovka	21	6,9	675	512	3,2	6	126	21	6	1,3	<b>10,1</b>	<b>0,19</b>	8,8	4,3	<b>5,1</b>	0,011	1,7	0,43
39	Восточное/Vostochnoe	50	7,1	638	488	2,6	1	114	16	15	1,4	<b>5,3</b>	<b>0,14</b>	<b>10,6</b>	4,9	<b>4,5</b>	0,011	0,6	0,22
45	Каргасок/Kargasok	150	6,8	532	403	3,0	1	96	16	11	1,6	<b>5,5</b>	<b>0,08</b>	<b>14,5</b>	<b>5,6</b>	<b>4,5</b>	0,005	0,6	0,21
46	Старица/Staritsa	96	6,9	469	305	1,7	44	66	15	38	1,6	<b>6,7</b>	<b>0,16</b>	<b>13,5</b>	3,1	2,0	0,014	2,6	0,18
48	Н. Чигара/N. Chigara	40	7,0	589	451	1,2	1	112	16	8	0,9	<b>11,8</b>	<b>0,41</b>	<b>10,2</b>	4,3	<b>3,4</b>	0,005	0,5	0,17
49	Инкино/Inkino	105	6,8	703	458	6,1	70	142	17	9	1,8	<b>13,7</b>	<b>1,40</b>	9,7	3,6	1,8	0,005	4,1	0,13
56	Подоба/Podoba	30	7,2	544	415	0,5	1	108	12	6	1,4	<b>5,1</b>	<b>0,20</b>	7,3	<b>9,0</b>	0,4	0,008	0,5	0,07
68	Тегульдэт/Teguldet	50	6,8	554	421	4,2	1	98	18	11	0,6	<b>3,3</b>	0,09	<b>12,0</b>	1,6	0,4	0,003	0,6	0,03
70	Б. Жирово/B. Zhirovo	14	7,0	622	458	6,9	11	120	16	9	1,0	<b>8,9</b>	0,05	7,1	2,8	0,1	0,002	0,6	0,03
100	Высокий Яр/Vysokiy Yar	25	6,9	657	475	6,0	19	124	22	9	1,6	<b>5,0</b>	<b>0,96</b>	<b>10,5</b>	<b>8,1</b>	0,8	0,050	0,1	0,06
<b>Воды меловых отложений/Water of Cretaceous sediments</b>																			
110	Бакчар/Bakchar	161	7,2	886	634	11,3	22	116	35	65	2,2	<b>2,4</b>	<b>0,10</b>	<b>10,8</b>	1,5	<b>2,7</b>	0,080	0,5	0,57
112	Поротниково/Porotnikovo	175	7,3	835	634	2,1	2	112	23	60	2,0	<b>2,0</b>	<b>0,19</b>	9,1	1,2	<b>2,2</b>	0,003	1,6	0,25
113	Плотниково/Plotnikovo	156	7,2	1062	744	2,4	51	126	40	95	2,7	<b>2,3</b>	<b>0,13</b>	<b>10,1</b>	2,0	<b>5,3</b>	0,011	5,3	0,04
123	Усть-Бакчар/Ust-Bakchar	130	7,0	871	525	2,2	115	126	24	76	2,1	<b>5,8</b>	<b>0,19</b>	<b>13,9</b>	4,3	<b>3,0</b>	0,005	3,3	0,12
126	Бакчар/Bakchar	273	8,0	416	231	8,1	58	7	4	105	2,5	0,3	0,01	6,6	7,5	0,8	0,020	0,1	0,45
125	Чажемто/Chazhemto	740	8,1	1409	405	0,4	<b>515</b>	20	6	<b>454</b>	1,1	0,1	-	4,3	3,4	1,0	0,002	1,8	0,15
108	Кенга/Kenga	380	8,1	2652	402	0,1	<b>1267</b>	46	21	<b>900</b>	6,0	0,3	0,04	7,5	1,0	<b>3,3</b>	0,005	5,1	0,14

Примечание: \* – глубина; \*\* – минерализация вод; жирным шрифтом – превышения относительно ПДК<sub>хн</sub>; курсивом – техногенно-трансформированные воды.

Note: \* – depth; \*\* – water mineralization; exceedance relative to MPC is in bold; technogenic-transformed water is in italic.

условиях, наблюдается рост ионов Cl<sup>-</sup> (до 215 мг/л), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (до 134 мг/л), Ca<sup>2+</sup> (до 280 мг/л), Na<sup>+</sup> (до 30 мг/л), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (до 230 мг/л). В связи с увеличением кальция увеличивается и общая жесткость до 16 мг-экв/л. Особое внимание хотелось бы обратить на присутствие в повышенных количествах азотистых соединений. Наиболее всего это касается NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, концентрации которого в данных водах 50–230 мг/л при ПДК<sub>хн</sub> 45 мг/л.

Подземные воды палеогеновых отложений наиболее широко в Томске и Томской области используются, как централизованно, так и не централизованно, для питьевых целей. Было отобрано 82 пробы из питьевых скважин глубиной от 11 до 180 м. Воды являются пресными, но отличаются повышенной минерализацией (от 154 до 835 мг/л), характеризуются более высокими значениями рН (6,6–8,1). По химическому составу это гидрокарбонатные кальциевые воды. Содержания C<sub>орг</sub> в исследуемых водах изменяются в диапазоне от 0,1 до

21,2 мг/л и в среднем составляют 5,0 мг/л. Увеличиваются концентрации Si от 3,7 до 22,0 мг/л. ОЖ меняется в широком пределе – от 0,9 до 10,1 мг-экв/л, но в целом наблюдается увеличение. Из азотистых соединений в концентрациях, превышающих ПДК<sub>хн</sub> (2 мг/л), встречается NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – от 0,1 до 6,7 мг/л, при средних 2,2 мг/л.

Диапазон концентраций Fe шире – от 0,1 до 25,5 мг/л, но в среднем (6,1 мг/л) остается на том же уровне, что и у вышележащих вод. Содержание марганца также превышено, максимально равно 1,4 мг/л и в среднем такое же – 0,3 мг/л.

Подземные воды верхнемеловых отложений изучены в 18 пробах из 14 скважин глубиной от 130 до 300 м. По имеющимся данным они относятся к пресным или солоноватым (минерализация изменяется от 0,4 до 1,2 г/л), отличаются повышенной щелочностью (рН 6,9–8,6). Наблюдается смена состава вод от гидрокарбонатных кальциевых до гидрокарбонатных натриевых (содовых).



Соответственно, в содовых водах ОЖ резко падает до 0,3–5,7 мг-экв/л, в кальциевых – остается высокой – 7,5–10 мг-экв/л. В заметных количествах начинает появляться ион хлора – до 138 мг/л.

Содержание Fe в водах, наоборот, уменьшается почти в два раза – до 2,7 мг/л в среднем, но в целом остается высоким (0,2–10,3 мг/л). Содержание марганца в среднем уменьшается до 0,1 мг/л, т. е. стало на уровне ПДК<sub>хп</sub>.

Концентрации С<sub>орг</sub> и Si остаются на том же уровне. Из азотистых соединений в концентрациях, превышающих ПДК<sub>хп</sub>, встречается NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – от 0,8 до 5,3 мг/л, при средних 2,4 мг/л.

Подземные воды нижне-верхнемеловых отложений (симановская и покурская свиты) представлены всего 7 пробами из четырех скважин (Кенга, Колпашево, Чажемто, Белый Яр), циркулируют на глубинах 300–2000 м, для питьевых целей используются редко. Воды солоноватые (0,8–2,7 г/л), наблюдается смена состава – от содовых до хлоридных натриевых. Соответственно, растут концентрации хлора и натрия. Величина ОЖ (0,4–4,0 мг-экв/л), С<sub>орг</sub> (0,1–3,4) и концентрации Si (4,3–7,5) резко уменьшаются. Азотистые соединения в повышенных количествах не встречались. До уровня ПДК<sub>хп</sub>

уменьшается содержание Fe (от сотых долей до 0,5 мг/л), Mn встречается в незначительных концентрациях (0,01–0,04 мг/л).

#### Микрокомпонентный состав подземных вод

Всего изучено 57 проб (12 в водах неоген-четвертичных отложений, 41 – в палеогеновых, 4 – в меловых) по 48 элементам в каждой, наиболее показательные из которых представлены в табл. 2. Во всех водоносных горизонтах повышенными содержаниями относительно вод зоны гипергенеза [21] отличаются следующие компоненты: В, Sr, Ba, и, конечно, Fe, Mn, Si, о которых уже писали выше и здесь не будем останавливаться. Пониженными значениями характеризуются Al, Ti, V, Cr, Zr, Cd, Cs, Ce, Th. Такие элементы, как Ge, Y, Sn, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Tl, Bi, встречаются в сотых долях мкг/л и меньше.

Отдельно для водоносных горизонтов выявлены следующие особенности. В водах неоген-четвертичных отложений понижены концентрации следующих элементов (кроме уже отмеченных выше): Co, Ni, Cu, Ga, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, La, Pb, U. В водах палеогеновых отложений – Ga, Zr, Nb, Mo, Sn. При этом точно повышены концентрации Zn до 1,8 мг/л, V до

**Таблица 2.** Микрокомпонентный состав некоторых проб питьевых подземных вод децентрализованного водоснабжения, мкг/л  
**Table 2.** Trace elements of some drinking groundwater of the decentralized water supply, ppb

№	Компонент/Component	Li	B	Al	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Sn	Sb	Cs	Ba	Pb
Среднее для зоны гипергенеза [21] Mean value for hypergenesis zone [21]		13	78	226	17	1,3	3,0	0,4	3,6	5,6	41	1,5	1,9	183	1,7	0,4	0,7	0,3	18,3	3
ПДК [19]/MPC [19]		30	500	500	–	100	50	100	100	1000	5000	50	100	7000	250	–	50	–	100	30
<b>Воды неоген-четвертичных отложений/Water of the Neogene-Quaternary sediments</b>																				
7	Белояровка/Beloyarovka	2,7	25	1,4	2,0	0,06	0,6	0,2	1,4	0,05	22,2	0,05	2,3	480	0,6	0,05	0,01	0,02	155	0,26
8	Юдино/Yudino	7,1	16	14,7	3,2	0,74	1,0	0,3	0,4	0,13	7,7	10,6	0,2	143	0,2	0,06	0,01	НПО	65	0,06
9	Палочка/Palochka	2,1	13	3,1	2,5	0,30	0,9	НПО	0,2	0,06	4,3	0,05	2,3	188	0,1	0,05	0,01	0,01	90	0,09
10	Улу-Юл/Ulu-Yul	4,8	17	1,6	1,9	0,12	0,7	НПО	0,2	0,05	14,9	0,08	0,8	165	0,1	0,06	0,02	0,02	64	0,08
13	Тегульдэт/Teguldet	–	37	9,7	2,7	0,07	0,2	0,1	0,3	1,32	5,3	0,24	3,1	518	0,1	0,04	0,02	0,05	<b>134</b>	0,98
12	Инкино/Inkino	–	492	20,6	3,5	0,12	0,8	0,3	НПО	0,67	14,4	0,21	9,5	3317	0,1	0,08	0,12	0,15	<b>1200</b>	0,47
17	Инкино/Inkino	–	37	222	5,7	2,12	1,0	0,5	3,3	1,93	6,7	2,80	0,9	286	0,4	НПО	0,11	0,02	61	0,81
<b>Воды палеогеновых отложений/Water of Paleogene sediments</b>																				
59	Гореловка/Gorelovka	7,4	139	1,5	2,3	0,28	0,7	НПО	1,1	0,1	182	9,62	0,4	935	0,0	0,05	0,02	0,02	<b>189</b>	0,03
75	Самусь/Samus	4,1	28	1,8	1,8	0,02	0,9	НПО	0,9	0,1	5,5	0,03	6,2	798	0,1	0,08	0,01	0,01	<b>311</b>	0,05
76	Итатка/Itatka	1,0	40	4,0	1,5	0,09	0,6	1,0	1,0	НПО	4,4	16,9	1,6	409	0,7	0,03	0,03	НПО	<1	0,13
78	Степановка/Stepanovka	–	16	4,2	2,4	1,23	0,9	0,1	0,3	0,2	6,1	0,99	0,9	157	0,1	0,04	0,05	0,05	49	0,21
87	Катайга/Katayga	–	6	14,1	4,1	0,36	2,2	0,3	3,1	1,0	8,6	0,06	5,4	125	0,2	0,22	0,35	0,04	<b>117</b>	1,08
90	Орловка/Orlovka	–	25	1,2	1,0	0,02	0,1	НПО	НПО	0,6	0,4	0,02	5,0	486	0,0	НПО	НПО	0,01	<b>219</b>	0,01
93	Кол. Гривы/Kol. Grivy	–	295	14,7	9,9	0,54	2,1	1,3	9,1	21,3	1472	1,33	5,2	1777	0,6	0,78	1,03	0,14	<b>4026</b>	1,96
95	Каргасок/Kargasok	–	39	93,1	4,9	0,29	0,9	0,8	0,5	2,0	12,3	10,33	1,7	66	2,1	0,74	0,31	0,13	<b>164</b>	2,22
96	Чигара/Chigara	–	315	37,9	7,1	11,3	2,8	3,0	11,8	48,4	1784	3,33	0,9	489	0,6	1,01	1,73	0,15	<b>4609</b>	6,75
98	Белый яр/Beliy yar	–	315	10,0	3,8	0,4	0,5	0,1	1,3	0,3	12,8	18,14	0,8	1627	0,2	0,22	0,15	0,03	<b>318</b>	1,10
99	Первомайское/Pervomayskoe	–	<b>557</b>	13,1	3,3	0,2	0,7	1,1	3,2	2,4	364	2,78	3,6	979	0,3	0,29	2,06	0,08	<b>594</b>	1,59
<b>Воды меловых отложений/Water of Cretaceous sediments</b>																				
116	Кенга/Kenga	<b>31</b>	<b>2331</b>	2,1	0,7	0,2	1,2	НПО	НПО	НПО	4,9	23,9	4,2	1322	1,6	0,03	0,03	0,04	<b>196</b>	0,04
117	Усть-Бакчар/Ust-Bakchar	6,0	108	3,3	2,5	0,1	0,9	0,6	7,8	НПО	7,3	0,8	4,3	1034	0,5	0,01	0,05	0,06	<b>275</b>	0,45
123	Усть-Бакчар/Ust-Bakchar	–	104	14,9	2,6	0,14	0,4	0,1	0,1	0,4	5,6	1,26	4,1	1073	0,1	0,02	0,05	0,07	<b>301</b>	0,86
125	Чажемто/Chazhemto	–	152	15,1	0,9	0,4	0,3	0,1	1,3	0,5	2,3	1,4	1,3	209	0,1	0,01	0,10	0,02	22	0,93

Примечание: НПО – ниже пределов обнаружения; жирным шрифтом – превышения относительно ПДК<sub>хп</sub>; курсивом – техногенно-трансформированные воды.

Note: NPO (BDL) is below detection limits; exceedance relative to MPC is in bold; technogenic-transformed water is in italic.

11,3 мкг/л, Со до 3,0 мкг/л, Ni до 11,8 мкг/л, Sn до 1 мкг/л, Sb до 1,7 мкг/л, Ва до 4,6 мг/л, Pb до 6,7 (все для пробы из п. Н. Чигара). В водах меловых отложений в концентрациях выше среднего для зоны гипергенеза встречены также Li, As, Rb.

Для большинства подземных вод характерно превышение ПДК<sub>хн</sub> по Ва. Особенно выделяются две пробы в скважинах сёл Коломинские Гривы и Чигара, где превышения ПДК<sub>хн</sub> составляют 40–50 раз. В воду барий попадет в основном из природных источников – барийсодержащих минералов. В чистом виде в регионе они не отмечаются, вероятно, барий присутствует в изоморфной смеси

кальциевых минералов. В почвах региона данный элемент также присутствует в значительных концентрациях [22]. Попадая в воду, при отсутствии сульфатов, Ва способен к концентрированию [23].

Содержания В и Li превышают ПДК<sub>хн</sub> лишь в единичных пробах.

Микрокомпонентный состав *техногенно-трансформированных* подземных вод определен в двух пробах (все в колодцах Инкино). Превышения определены по следующим компонентам (в мкг/л): В (492), Al (222), V (2,1), Sr (3317), Ва (1200). При этом Ва максимально превышает ПДК<sub>хн</sub> (100) в 12 раз, а В – на уровне ПДК<sub>хн</sub> (500).

**Таблица 3.** Групповой состав микроорганизмов в подземных питьевых водах Томской области

**Table 3.** Group structure of microorganisms in drinking groundwater of Tomsk region

№	Физиологические группы бактерий, кл/мл/Physiological groups of bacteria, kl/ml										Общее количество бактерий Total number of bacteria
	Психрофильные сапрофиты Psychrophilic saprophytes	Автохтонные сапрофиты Autochthonic saprophytes	Олиготрофы Oligotrophs	Нефетеролепрантные Petrotolerant	Гетеротрофные железокисляющие Heterotrophic iron-oxidizing	Толуолокисляющие Toluene Oxidation	Тионовые Thionobacteria	Сульфатвосстанавливающие Sulphate reducing	Бензопокисляющие Benzene oxidizing	Автотрофные аэробные железокисляющие Autotrophic aerobic iron-oxidizing	
	тыс. кл/мл (thous. cells/ml)				y.e. (standard units)		кл/мл (cells/ml)				
<b>Воды неоген-четвертичных отложений/Water of the Neogene-Quaternary sediments</b>											
1	7,5	158,0	56,6	2,6	1800	0	0	100	100	0	226,7
2	17,4	510,0	43,2	3,3	1400	0	0	0	0	10	575,4
3	104,0	265,0	23,7	3,4	7000	0	10	0	0	0	616,4
4	8,4	52,0	98,0	79,0	0	0	100	10	0	100	237,6
<b>Воды палеогеновых отложений/Water of Paleogene sediments</b>											
31	72,0	25,0	21,0	24,0	0	250	10	0	170	0	142,4
36	42,0	162,0	120,4	6,0	940	0	0	0	0	0	331,3
38	136,0	105,0	126,6	3,8	1300	0	100	0	310	100	373,2
40	4,1	123,0	63,3	1,1	80	0	10	0	250	0	191,9
41	83,0	19,6	55,9	0,2	70	0	0	0	0	0	335,2
42	13,0	23,3	126,0	53,7	300	0	0	0	0	10	426,5
45	210,0	171,0	21,2	16,8	0	0	0	0	160	100	761,5
46	48,0	33,6	42,4	9,0	1250	0	0	0	0	0	134,3
49	19,0	32,5	44,4	1,7	3700	0	0	0	220	0	101,5
50	135,0	68,8	40,6	15,0	360	0	0	0	240	0	260,0
51	134,7	61,5	71,5	6,3	5200	0	0	0	240	0	279,4
52	67,4	110,0	38,1	10,5	480	0	0	0	280	100	226,9
53	114,0	68,1	190,0	0	50	270	0	0	330	100	372,9
54	4,3	33,2	100,0	33,0	1700	0	0	0	220	0	172,4
55	157,0	24,7	17,0	26,4	0	0	0	0	340	0	225,4
56	16,5	110,3	164,0	0,1	30	0	0	0	0	0	290,9
57	386,5	177,0	143,0	0	310	0	0	0	400	0	707,2
<b>Воды меловых отложений/Water of Cretaceous sediments</b>											
110	120,0	226,0	72,0	2,2	30	0	100	10	190	0	420,5
111	87,0	57,2	96,0	5,2	0	0	0	10	0	0	245,5
113	85,4	132,0	47,2	3,5	0	0	0	100	0	0	693,0
114	85,1	169,4	8,6	5,8	3800	100	0	100	380	1000	274,3
115	188,0	225,0	12,6	0	0	0	0	0	0	0	539,0

Примечание: 1 – Кенга (Kenga), 2 – Белояровка (Belojarovka), 3 – Юдино (Yudino), 4 – Палочка (Palochka), 31 – Бакчар (Bakchar), 36 – Гореловка (Gorelovka), 38 – Чаинск (Chainsk), 40 – Коломинские Гривы (Kolominskie Grivy), 41 – Большая Саровка (Bolshaya Sarovka), 42 – Белый Яр (Beliy Yar), 45 – Каргасок (Kargasok), 46 – Старица (Staritsa), 49 – Инкино (Inkino), 50 – Тунгусово (Tungusovo), 51 – Молчаново (Molchanovo), 52 – Малиновка (Malinovka), 53 – Вознесенка (Voznesenka), 54 – Володино (Volo-dino), 55 – Жарковка (Zharkovka), 56 – Подоба (Podoba), 57 – Кривошеино (Krivosheino), 110 – Бакчар (Bakchar), 111 – Бакчар (Bakchar), 113 – Плотниково (Plotnikovo), 114 – Усть-Бакчар (Ust-Bakchar), 115 – Колпашево (Kolpashevo)

### Микробиологический состав питьевых подземных вод

Сделан микробиологический анализ 26 проб подземных вод с использованием классических методик, основанных на применении селективных (избирательных) питательных сред [24].

Исследования показали, что микрофлора подземных вод представлена различными физиологическими группами микроорганизмов, осуществляющих деструкцию органических и минеральных веществ: сапрофитами, олиготрофами, нитрифицирующими, сульфатредуцирующими, железокисляющими, нефтеокисляющими бактериями (табл. 3).

Наиболее распространенными в подземных водах по способу питания являются гетеротрофные микроорганизмы, т. е. использующие для синтеза своего организма готовые органические вещества (олиготрофы, сапрофиты, нефтеокисляющие, бензолкисляющие, толуолокисляющие, сульфатвосстанавливающие). Автотрофные микроорганизмы, использующие углерод неорганических соединений, присутствуют единично – железобактерии и денитрифицирующие.

Из гетеротрофных по численности доминируют автохтонные микроорганизмы, психрофильные сапрофиты (рис. 3, а) и олиготрофные бактерии (рис. 3, б). Их численность в сотни раз выше по отношению к другим.

Автохтонные микроорганизмы питаются органическим углеродом (табл. 1), который в исследуемых водах представлен в основном гумусовыми соединениями. Психрофильные сапрофиты развиваются в температурном диапазоне от 0 до 20 °С, что также характерно для наших холодных вод. Олиготрофы развиваются в среде с низкой концентрацией питательных веществ, т. е. с низкой минерализацией и низкой концентрацией органических веществ. Они характеризуют способность микробного сообщества ассимилировать из рассеянного состояния элементы питания.

Гетеротрофные железокисляющие бактерии присутствуют в большинстве проб, но численность их резко меняется: от нескольких десятков до нескольких тысяч клеток на мл. Более высокое их содержание наблюдается в водах первого водоносного горизонта неоген-четвертичных отложений и снижается с глубиной. Сами по себе эти бактерии не представляют опасности для организма человека, однако продукты их жизнедеятельности канцерогенны. Биогеохимия железобактерий связана с деструкцией железосодержащего органического вещества, которое они используют в качестве источника углерода и энергии [25]. Освобождающееся при этом железо окисляется химически и откладывается в виде гидроокиси. Данные отложения накапливаются в колодцах, мелких частных скважинах

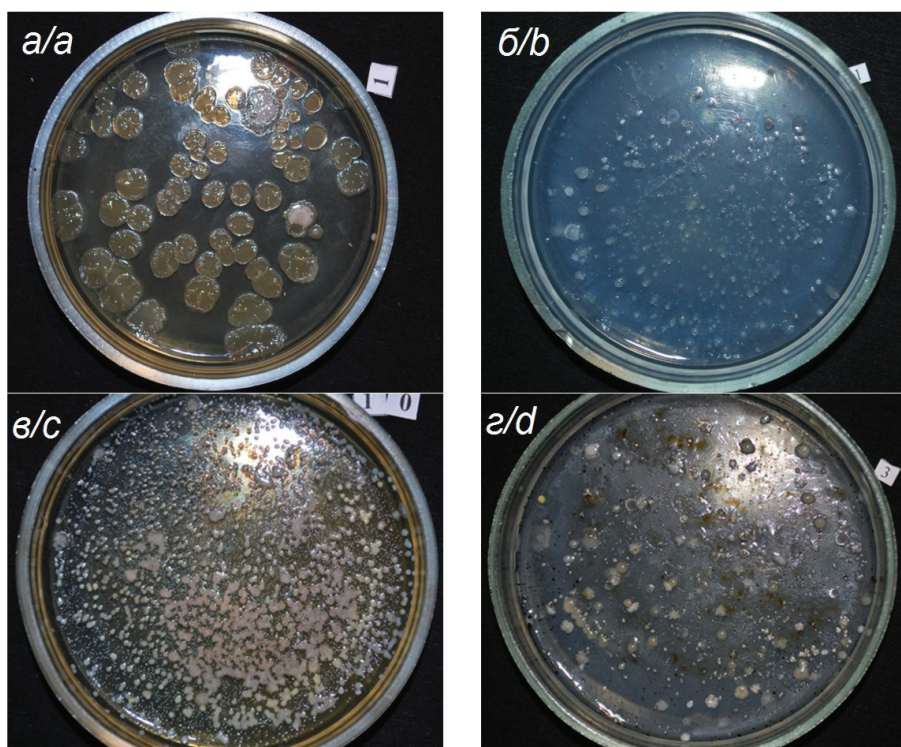


Рис. 3. Фото микроорганизмов питьевых подземных вод децентрализованного пользования, культивированных на твердых питательных средах на чашках Петри: а) психрофильные сапрофиты; б) олиготрофные бактерии; в, г) нефтеокисляющие бактерии

Fig. 3. Photos of microorganisms of drinking groundwater of the decentralized use, cultivated on nutrient media on Petri's: a) psychrophilic saprophytes; b) oligotrophic bacteria; c, d) oil-oxidizing bacteria

или водопроводных трубах и создают тем самым благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий группы кишечных палочек (энтеробактерий), гнилостных и анаэробных бактерий.

Почти во всех пробах воды были автотрофные, образующие охру, железобактерии, для которых процесс окисления железа имеет энергетическое значение. Образующаяся при этом гидроокись откладывается в клеточных стенках бактериальных клеток. Несмотря на повсеместное присутствие, количественное содержание этих бактерий в водах было незначительным – от единичных клеток до нескольких десятков на мл.

В воде большинства проб были обнаружены нефтотолерантные бактерии – от первых сотен до нескольких десятков тысяч (рис. 3, в и г). Эти бактерии выдерживают присутствие различного количества нефтепродуктов в водной среде, используя их в большинстве случаев в процессах соокисления. Это подтверждается величиной потенциальной способности к деструкции нефти биоценозами изученных вод. Микрофлора, обладающая высокой нефтеокисляющей способностью, была обнаружена в небольшом количестве проб.

Бактерии, окисляющие бензол, обнаружены в большом количестве в водах горизонта палеогеновых отложений с высокой интенсивностью развития – до 400 условных единиц (при возможном значении 500 условных единиц). В некоторых пробах были встречены толуолокисляющие бактерии. И те и другие считаются достоверными показателями наличия в среде обитания органических веществ нефтяного характера, мигрирующих как из подземного пространства, так и с поверхности. Непременной составляющей бактериоценозов изученных вод были денитрифицирующие бактерии. Количество их менялось от десятков клеток до сотен тысяч и увеличивалось с глубиной. Нитрифицирующие бактерии присутствовали в водах в небольшом количестве в единичных пробах.

Оценка экологического состояния природных вод по количеству отдельных физиологических групп общего состава микроорганизмов широко используется экологами в настоящее время, хотя эти группы не входят в обязательный перечень санитарно-гигиенических показателей, на них не распространяются ГОСТы, нет четких количественных микробиологических критериев для установления бактериального загрязнения подземных вод.

Основными показателями загрязненности вод служат коли-титр и коли-индекс. Коли-титр – это наименьший объем воды в мл, содержащий одну кишечную палочку. Коли-индекс – количество кишечных палочек в 1000 мл воды. По ГОСТу на питьевую воду допускается коли-индекс не более 3, коли-титр не менее 300 [26]. Как показали исследования, в пробах питьевых подземных вод децентрализованного водоснабжения области кишечная палочка не обнаружена. По количеству психрофильных сапрофитов все изученные воды являют-

ся или загрязненными, или грязными, но обладающими способностью к самоочищению [25].

К сожалению, микрофлора определенных нами как техногенно-трансформированные воды неоген-четвертичных отложений не была изучена.

#### Обсуждение результатов

Таким образом, по химическому составу подземные воды области чаще всего, по нашим данным, не пригодны для питьевого водоснабжения по таким компонентам, как Fe, Mn, Сорг, Si, частично ОЖ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , из микрокомпонентов – Ba, редко B и Li. Эти превышения отражают естественный природный фон территории и характерны для всего региона. Исключения составляют техногенно-трансформационные воды неоген-четвертичных отложений, отобранные в колодцах и частных скважинах, отличающиеся повышенным содержанием общей минерализации, за счет  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  (соответственно ОЖ),  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , и повышенным содержанием некоторых микрокомпонентов: B, Al, V, Sr, Ba. Они представлены всего 4 пробами, что затрудняет их интерпретацию. Более детально такие воды в южных районах области исследованы в работе [20].

Пространственные исследования распространения элементов сложны, поскольку выборка недостаточно представительна с учетом разделения на несколько водоносных горизонтов. Имеющиеся данные четких закономерностей не выявили. Общеизвестно, что Fe, Mn, Сорг,  $\text{NH}_4^+$  тяготеют к северным, более болотистым районам. Минерализация, ОЖ и Si, наоборот, – к югу области, где происходит питание трещинно-жильными водами Кольвань-Томской складчатой области.

Наиболее показательны результаты исследований по изменению состава вод с глубиной. Как видно из рис. 4, для подземных вод характерна прямая вертикальная зональность, т. е. последовательное увеличение минерализации вод (и, соответственно, изменение химического типа воды) с глубиной. При этом с глубиной увеличивается щелочность вод за счет группы  $\text{OH}^-$ , выделяемой при гидролизе вмещающих пород. Состав вод меняется с гидрокарбонатного кальциевого в палеоген-четвертичных отложениях до гидрокарбонатного натриевого (содового) в меловых отложениях и далее становится хлоридным натриевым. С глубиной Ca уходит из вод во вторичные отложения (карбонаты и глины), а Na продолжает накапливаться. Si сначала накапливается в водах за счет растворения алюмосиликатных минералов до глубин 200 м, затем также связывается глинами.

В общем случае максимальные содержания Fe, Mn и  $\text{C}_{\text{орг}}$  в водах (рис. 4) характерны до глубины 200 м, где развита глеевая (Eh от -100 до +50 мВ) и околонейтральная (рН от 6,8 до 7,5) среда. С глубиной, в более восстановительной сероводородной среде (менее -200 мВ), концентрации Fe уменьшаются, так как железо выпадает из раствора в виде труднорастворимых сульфидов либо (при отсут-

ствии источников S) в щелочных условиях – в виде сидерита. К тому же с глубиной уменьшается  $C_{орг}$ , т. к. расходуется на различные окислительные процессы, что мешает связыванию Fe в растворе посредством образования комплексных соединений. Более детально этот вопрос изучен в работе [14]. Mn также контролируется такими показателями, как pH и Eh, однако является более активным водным мигрантом, чем  $Fe^{2+}$ , осаждается на барьерах позже, а значит, область распространения его шире.

Из микрокомпонентов с глубиной увеличиваются концентрации таких элементов, как As, Li, B, Sr (рис. 4). Ba в повышенных концентрациях достаточно равномерно распределен по глубине.

Микрофлора приспосабливается к питательной среде – органическим и неорганическим соединениям. Поэтому с глубиной она себя ведет неоднозначно, поскольку, с одной стороны, минерализация вод увеличивается, с другой стороны, концентрации органических веществ, наоборот, уменьшаются (рис. 4). В целом общее количество бактерий с глубиной хоть и незначительно, но увеличивается (рис. 5). Групповой состав по всему разрезу остается однообразным. Увеличивается количество психрофильных и автохтонных сапрофитов. Количество олиготрофов, приспособленных к бедным питательным условиям, наоборот, уменьшается (рис. 5).

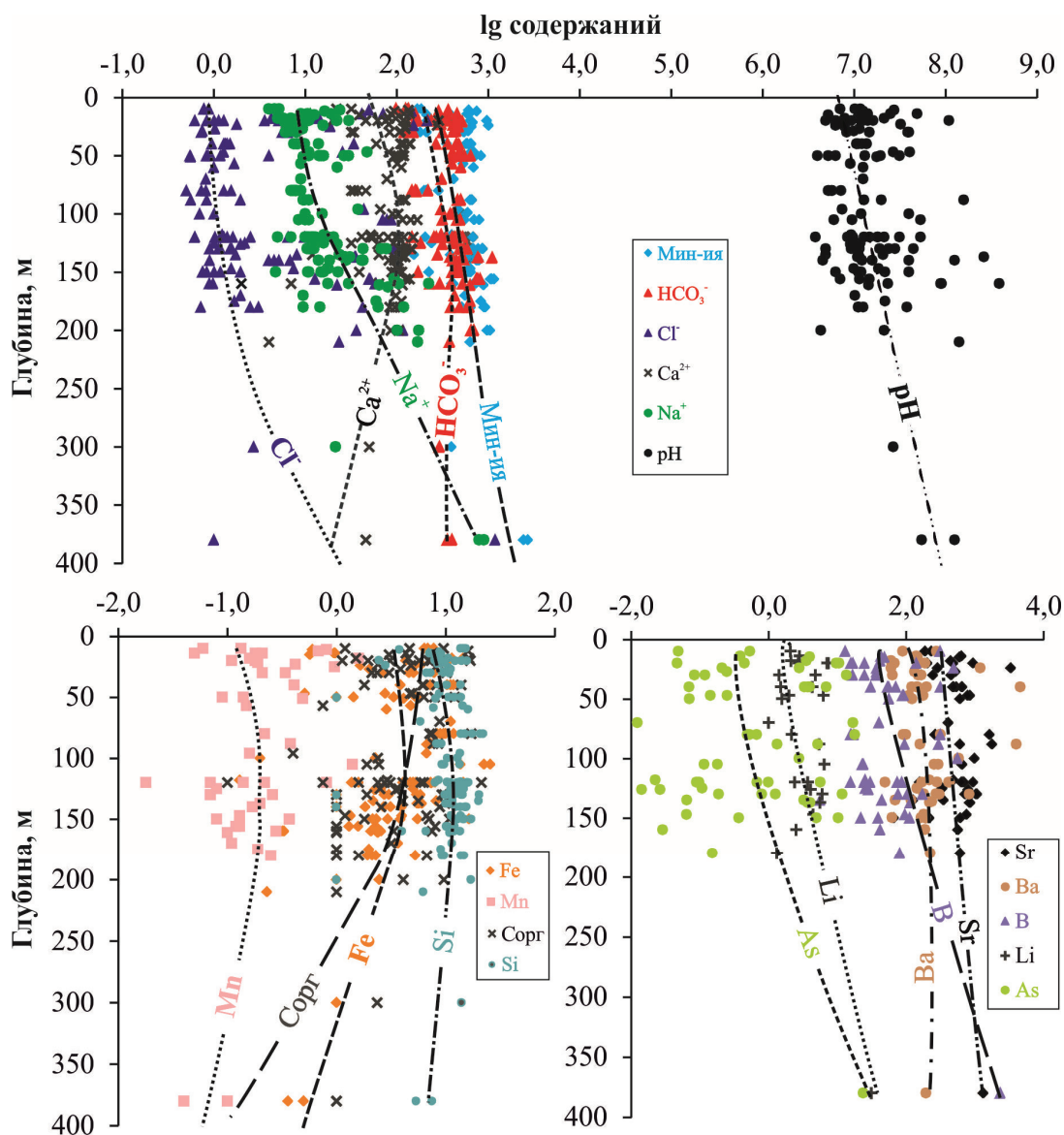


Рис. 4. Изменение химического состава и pH подземных вод с глубиной

Fig. 4. Changing of chemical composition and pH of groundwater by depth

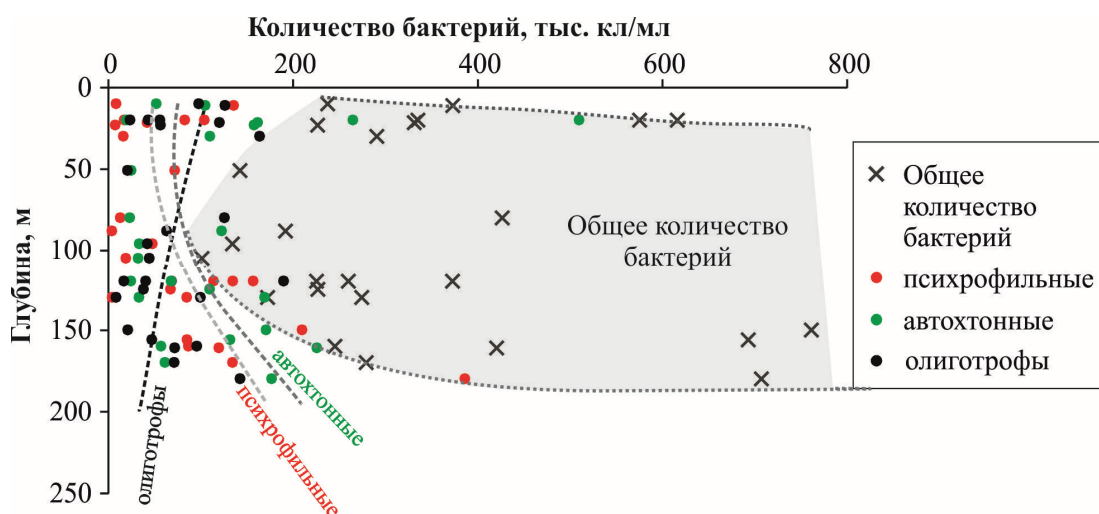


Рис. 5. Изменение микрофлоры вод с глубиной

Fig. 5. Change in microbial flora of groundwater by depth

#### Выводы

Проведенные исследования показали, что воды некоторых децентрализованных водопунктов южной и центральной частей Томской области являются в эпидемиологическом отношении безопасными (кишечная палочка не обнаружена), в то время как по химическому составу они часто не пригодны для питьевого водоснабжения по таким компонентам, как Fe, Mn, Сорг, Si, частично ОЖ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , из микрокомпонентов – Ва, редко В и Li. Данные превышения отражают естественный природный фон территории и характерны для всего региона. Исключение составляют отобранные пробы техногенно-трансформационных вод, незначительное число которых (всего 4) не позволяет делать однозначных выводов.

С глубиной увеличиваются общая минерализация вод, рН, меняется их состав – с гидрокарбонатного кальциевого или кальциево-магниевого на гидрокарбонатный натриевый (содовый), в нижнемеловых отложениях появляются хлоридные натриевые воды. Соответственно, минерализация вод

растет сначала за счет  $\text{Ca}^{2+}$  (соответственно, растет ОЖ) и  $\text{HCO}_3^-$ , частично Si, затем за счет  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , концентрации Ca, Si уменьшаются. Из микрокомпонентов с глубиной увеличивается содержание As, Li, B, Sr. Концентрации Fe, Mn, Сорг с глубиной, наоборот, уменьшаются.

Микрофлора приспосабливается к геохимической среде вод, т. е. богатой органикой, но бедной минеральными веществами. Соответственно, основное развитие получили гетеротрофные бактерии, питающиеся готовым органическим веществом. Автотрофные бактерии, использующие углерод неорганических соединений, присутствуют единично и представлены железобактериями и денитрифицирующими, что связано со специфической химической составом вод. Качественные и количественные изменения микрофлоры по разрезу четко не выявлены.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 16-05-00155\_а, 16-05-0002-мол\_а, 16-35-50103-мол\_нр.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2014 году: информационный бюллетень / под ред. В.А. Льготина. – Томск: АО «Томскгеомониторинг», 2015. – Вып. 11. – 257 с.
2. Гидрогеология СССР. Том XVI. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области). – М.: Недра, 1970. – 368 с.
3. Kasimova L.N., Urmazova T.A. Tomsk region drinking water sources, water quality monitoring // Science and Technology. KORUS 2000: Proc. the 4<sup>th</sup> Korea-Russia International Symposium. – Piscataway, NJ, 2000. – V. 1. – P. 292–296.
4. Савичев О.Г., Камнева О.А. Закономерности пространственных изменений химического состава подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 138–143.
5. Ecogeochemical characteristics of underground water of OB-TOM interfluvium (Russia) / E.P. Yankovich, K.S. Yankovich, V.A. L'gotin, G.A. Gul'mina // 15<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015: Conference proceedings. – Albena, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2015. – V. 2 (1). – P. 269–275.
6. Кончакова Н.В. Геохимия и санитарно-гигиеническая типизация подземных вод, используемых в питьевых целях в Томской области и Ханты-Мансийском автономном округе // Вода: химия и экология. – 2012. – № 1. – С. 24–31.
7. Многолетняя изменчивость химического состава подземных вод Томской области / В.А. Льготин, О.Г. Савичев, Ю.В. Макушин, О.А. Камнева // География и природные ресурсы. – 2012. – № 1. – С. 74–79.
8. Химический состав подземных вод как фактор риска для здоровья населения (на примере Томского района Томской области) / Е.П. Янкович, Н.А. Осипова, В.А. Льготин, О.Д. Лукашевич, К.С. Янкович // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 786–794.

9. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – № 1. – P. 3–15.
10. Naymushina O.S. Hydrodynamic transformations of the natural hydrogeological system of the Ob-Tom' watershed // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2013. – № 7. – P. 611–614.
11. Naymushina O. Drinking water supply of Tomsk (Western Siberia, Russia): groundwater resources and quality // 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014: Conference proceedings. – Albena, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2014. – V. 1. – P. 215–222.
12. Иванова И.С., Лепкурова О.Е., Шварцев С.Л. Железосодержащие воды Томской области // *Разведка и охрана недр*. – 2010. – № 11. – С. 58–62.
13. Geochemistry of Iron in Fresh Groundwater of the Sredneobskoy Basin, Russia / I.S. Ivanova, O.E. Lepokurova, O.S. Pokrovsky, S.L. Shvartsev // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2013. – № 7. – P. 385–388.
14. Iron-containing groundwater in the upper hydrodynamic zone in the central part of West-Siberian artesian basin / I.S. Ivanova, O.E. Lepokurova, O.S. Pokrovsky, S.L. Shvartsev // *Water Resources*. – 2014. – V. 41. – Iss. 5. – P. 163–177.
15. Lepokurova O.E., Ivanova I.S. Geochemistry of iron in organogenic water of Western Siberia, Russia // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2014. – № 10. – P. 297–302.
16. Иванова И.С., Лепкурова О.Е. Особенности микроэлементного состава подземных вод территории Бакчарского железорудного узла (Томская область) // *Вестник Томского государственного университета*. – 2015. – № 398. – С. 224–232.
17. Ресурсы пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна / Мин-во геол. СССР, ПГО «Новосибирск-геология»; сост.: И.М. Земскова, Ю.К. Смоленцев, М.П. Полканов и др. – М.: Недр, 1991. – 262 с.
18. Ермашова Н.А. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена Томской области в связи с решением вопросов водоснабжения и охраны: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 1998. – 44 с.
19. СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Минздрав России, 2002. – 103 с.
20. Kolubaeva Yu.V., Kopylova Yu.G., Shvartsev S.L. Hydrogeochemistry of northern part of Kolyvan-Tomsk folded zone (southeast of Western Siberia, Russia) // 15<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015: Conference proceedings. – Albena, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2015. – V. 1 (3). – P. 347–354.
21. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the earth // *Geochemistry International*. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
22. Ермашова Н.А. Гидрогеохимические особенности и условия формирования пресных подземных вод Обь-Чулымского междуречья // *Вопросы географии Сибири*. – Томск: Изд-во Томского университета, 1979. – С. 95–109.
23. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
24. Герхардт Ф., Мюррей Р., Костилоу Р., Нестер Е., Вуд В., Крейг Н., Филлипс Г. Методы общей бактериологии. Том 1 / пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 536 с.
25. Гусев М.В., Минеева Л.А. Общая микробиология. – М.: МГУ, 1973. – 376 с.
26. ГОСТ 18963–73. Вода питьевая. Методы санитарно-бактериологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2008. – 15 с.

Поступила 08.04.2016 г.

#### Информация об авторах

**Лепкурова О.Е.**, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией гидрогеохимии и геоэкологии ФГБУН Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Иванова И.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории пресноводных и морских экосистем ФГБУН Института экологических проблем Севера УрО РАН; научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НОЦ «Вода» кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Шварцев С.Л.**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории гидрогеохимии и геоэкологии ФГБУН Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Колубаева Ю.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеохимии и геоэкологии ФГБУН Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Наливайко Н.Г.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314

## CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL COMPOSITION OF GROUNDWATERS OF DECENTRALIZED WATER SUPPLY OF SOUTHERN AND CENTRAL DISTRICTS OF TOMSK REGION

**Olesya E., Lepokurova<sup>1,2</sup>,**  
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

**Irina S. Ivanova<sup>2,3</sup>,**  
IvanovaIS\_1986@mail.ru

**Stepan L. Shvartsev<sup>1,2</sup>,**  
Tomsk@ipgg.sbras.ru

**Yuliya V. Kolubaeva<sup>1</sup>,**  
Kolubaeva@inbox.ru

**Nina G. Nalivayko<sup>2</sup>,**  
biologistngn@yandex.ru

<sup>1</sup> Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia

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

<sup>3</sup> Institute of Ecological Problems of North of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 23, embankment of Northern Dvina, Arkhangelsk, 163000, Russia

*Relevance of the research is caused by the necessity of assessing the quality of drinking water, consumed by the population, in the conditions of decentralized water supply.*

**The aim** of the research consists in studying chemical and microbiological composition of groundwater which is formed in natural environment.

**Methods of research.** Chemical and microbiological compositions of water were investigated in the Problem research hydrogeochemical laboratory (TPU), which is registered in the System of analytical laboratories of Gosstandart of Russia. To carry out the full chemical analysis the authors applied the traditional methods. The microbiological analysis was carried out after sampling, as a rule, during the day, while the samples were kept in the cooler bag. To identify the microorganisms the authors used liquid and firm elective nutrient mediums. The trace elements were determined by mass-spectrometer method with inductively coupled plasma (ICP-MS) on the device Elan 6000 (Perkin Elmer) in Geo assets and environment laboratory of Toulouse (CNRS, France).

**Results.** The data of chemical and microbiological compositions of drinking groundwater of Quaternary, Neogene, Paleogene and Cretaceous sediments shown that water is epidemiologically safe (*Escherichia coli* is not detected), while they are not often suitable for drinking water supply by chemical composition on such components as Fe, Mn, COD, Si,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , trace elements – Ba, B and Li. Excess of these elements reflects natural background of the territory and they are typical of the whole region. The microbial flora reflects the geochemical environment, rich in organic matter, but poor in mineral substances.

### Key words:

Drinking groundwater, decentralized water management, Tomsk region, chemical and microbiological composition, trace elements.

*The research was financially supported by the RFBR grants no. 16-05-00155\_a, 16-05-0002-мол\_a, 16-35-50103-мол\_нр.*

### REFERENCES

1. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2014 godu: informatsionnyy byulleten* [The informational report on the status of subsoil of Siberian Federal district in 2014]. Ed. by V.A. Lgotin. Tomsk, Tomskgeomonitring Publ., 2015. Iss. 11, 257 p.
2. *Gidrogeologiya SSSR. T. XVI. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti)* [The USSR Hydrogeology. West Siberian plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Moscow, Nedra Publ., 1970. Vol. XVI, 368 p.
3. Kasimova L.N., Urmazova T.A. Tomsk region drinking water sources water quality monitoring. *Proc. the 4<sup>th</sup> Korea-Russia International Symposium. Science and Technology. KORUS 2000.* Piscataway, NJ, 2000. Vol. 1, pp. 292–296.
4. Savichev O.G., Kamneva O.A. The patterns of spatial changes in the chemical composition of groundwater of upper hydrodynamic zone in Tomsk region (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 138–143. In Rus.
5. Yankovich E.P., Yankovich K.S., L'gotin V.A., Gul'mina G.A. Ecogeochemical characteristics of underground water of OB-TOM interfluvium (Russia). *Proc. the 15<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015.* Albena, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd., 2015. Vol. 2, pp. 269–275.
6. Konchakova N.V. Geokhimiya i sanitarno-gigienicheskaya tipizatsiya podzemnykh vod, ispolzuemykh v pitevykh tselyakh v



- Tomskoy oblasti i Khanty-Mansiyskom avtonomnom okruge [Geochemistry and sanitary-hygienic typing of groundwater used in drinking purposes in Tomsk region and Khanty-Mansi Autonomous Area]. *Water: chemistry and ecology*, 2012, no. 1, pp. 24–31.
7. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V., Kamneva O.A. Mnogoletnyaya izmenchivost khimicheskogo sostava podzemnykh vod Tomskoy oblasti [Long-term variability of a chemical composition of groundwater of Tomsk region]. *Geography and Natural Resources*, 2012, no. 1, pp. 74–79.
  8. Yankovich E.P., Osipova N.A., Lgotin V.A., Lukashevich O.D., Yankovich K.S. Chemical composition of groundwater as a risk factor for health (by the example of Tomsk region). *Modern problems of science and education*, 2014, no. 3, pp. 786–794. In Rus.
  9. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in the Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2015, no. 1, pp. 3–15.
  10. Naymushina O.S. Hydrodynamic transformations of the natural hydrogeological system of the Ob-Tom' watershed. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, no. 7, pp. 611–614.
  11. Naymushina O. Drinking water supply of Tomsk (Western Siberia, Russia): groundwater resources and quality. *Proc. the 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014*. Albena, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd., 2014. Vol. 1, pp. 215–222.
  12. Ivanova I.S., Lepokurova O.E., Shvartsev S.L. Ferriferous waters of Tomsk region. *Prospect and protection of mineral resources*, 2010, no. 11, pp. 58–62.
  13. Ivanova I.S., Lepokurova O.E., Pokrovsky O.S., Shvartsev S.L. Geochemistry of Iron in Fresh Groundwater of the Sredneobskoy Basin, Russia. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, no. 7, pp. 385–388.
  14. Ivanova I.S., Lepokurova O.E., Pokrovsky O.S., Shvartsev S.L. Iron-containing groundwater in the upper hydrodynamic zone in the central part of West-Siberian artesian basin. *Water Resources*, 2014, vol. 41, Iss. 5, pp. 163–177.
  15. Lepokurova O.E., Ivanova I.S. Geochemistry of iron in organogenic water of Western Siberia, Russia. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2014, vol. 10, pp. 297–302.
  16. Ivanova I.S., Lepokurova O.E. Features of trace elements in the groundwater of the Bakchar iron ore deposit (Tomsk Region). *Tomsk State University Journal*, 2015, no. 398, pp. 224–232. In Rus.
  17. *Resursy presnykh i malomineralizovannykh podzemnykh vod yuzhnoy chasti Zapadno-Sibirskogo artezianskogo basseyna* [Freshwater and mineralized underground water resources of the southern part of the West Siberian artesian basin]. Ed. by E.V. Pinneker. Moscow, Nedra Publ., 1991. 262 p.
  18. Ermashova N.A. *Geokhimiya podzemnykh vod zony aktivnogo vodooobmena Tomskoy oblasti v svyazi s resheniem voprosov vodonabzheniya i okhrany*. Dis. Kand. nauk [Geochemistry of groundwater zone of active water exchange of Tomsk region in connection with the solution of water supply and protection. Cand. Diss.]. Tomsk, 1998. 44 p.
  19. *SanPiN 2.1.4.1074–01. «Pitevaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pitevogo vodonabzheniya. Kontrol kachestva: sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy»* [SanPiN 2.1.4.1074–01. «Drinking water. Hygienic requirements to water quality of the centralized systems of drinking water supply. Quality control: sanitary and epidemiologic rules and standards»]. Moscow, the Ministry of Health of Russia, 2002. 103 p.
  20. Kolubaeva Yu.V., Kopylova Yu.G., Shvartsev S.L. Hydrogeochemistry of northern part of Kolyvan-Tomsk folded zone (southeast of Western Siberia, Russia). *Proc. the 15<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015*. Albena, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd., 2015. Vol. 1, pp. 347–354.
  21. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
  22. Ermashova N.A. Gidrogeokhimicheskie osobennosti i usloviya formirovaniya presnykh podzemnykh vod Ob-Chulym'skogo mezhdurechya [Hydrogeochemical features and conditions of formation of fresh groundwater of Ob-Chulym interfluvium]. *Voprosy geografii Sibiri*. Tomsk, Tomsk State University Press, 1979. pp. 95–109.
  23. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty [Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.
  24. Gerhardt Ph., Murray R., Costilow R., Nester Eu., Wood W., Krieg N., Phillips G. *Manual of Methods for General Bacteriology*. Washington, American Society for Microbiology, 1981. 536 p.
  25. Gusev M.V., Mineeva L.A. *Obshchaya mikrobiologiya* [General microbiology]. Moscow, Moscow State University Publ., 1973. 376 p.
  26. *GOST 18963–73. «Voda pitevaya. Metody sanitarno-bakteriologicheskogo analiza»* [State Standard 18963–73. «Drinking water. Methods of sanitary and bacteriological analysis»]. Moscow, Standartinform Publ., 2008.

Received: 8 April 2016.

#### Information about the authors

**Olesya E., Lepokurova**, Cand. Sc., head of Laboratory, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Irina S. Ivanova**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Ecological Problems of North of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Stepan L. Shvartsev**, Dr. Sc., chief researcher, Tomsk branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Yuliya V. Kolubaeva**, Cand. Sc., researcher, Tomsk branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Nina G. Nalivayko**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.42: 553.97

## ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТОРФАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Арбузов Сергей Иванович<sup>1</sup>,  
siarbuzov@mail.ru

Маслов Станислав Григорьевич<sup>1</sup>,  
maslovsg@tpu.ru

Ильенок Сергей Сергеевич<sup>1</sup>,  
ilenokss@rambler.ru

Перегудина Елена Владимировна<sup>1</sup>,  
pere-elena@mail.ru

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

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью определения природы и разработки моделей накопления редкоземельных элементов в торфах и углях для прогнозирования и выявления редкометалльного оруденения в угленосных отложениях, а также необходимостью получения всеобъемлющей информации в связи с комплексным использованием торфа в сельскохозяйственном производстве.

**Цель работы:** изучить формы нахождения и оценить баланс форм нахождения редкоземельных элементов в торфах Западной Сибири; оценить роль органического и минерального вещества в накоплении редкоземельных элементов в верховом и низинном торфе и на этой основе определить природу накопления лантаноидов в торфах.

**Методы исследования:** разделение торфа на групповые составляющие по методу Инсторфа: битумы, водорастворимые и легкогидролизующие вещества, гуминовые и фульвокислоты, негидролизующий остаток, и изучение содержания в них редкоземельных элементов методом инструментального нейтронно-активационного анализа; расчет баланса РЗЭ по фракциям группового состава; сканирующая электронная микроскопия с применением микроскопа Hitachi S-3400N с энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash 4010 для изучения минеральных форм.

**Результаты.** Выделены и изучены групповые составляющие торфов Западной Сибири. Установлено, что в торфах основная масса РЗЭ связана с фракцией легкогидролизующих и водорастворимых веществ и с органическим веществом. На фракцию легкогидролизующих и водорастворимых веществ приходится от 40 до 80 % от валового содержания РЗЭ в торфе. В гуминовых кислотах сосредоточено 10...30 % от суммы РЗЭ. Минеральное вещество в торфе играет второстепенную роль в накоплении лантаноидов. В целом в балансе редкоземельных элементов в торфе на минеральное вещество приходится не более 25 %. Среди минеральных форм РЗЭ в торфах преобладают фосфаты (монацит, гойяцит, ксенотим) и циркон. Отмечено разделение лантаноидов во фракциях группового состава торфа. Фракция водорастворимых и легкогидролизующих веществ относительно обогащается легкими редкими землями, а гуминовые вещества – тяжелыми.

### Ключевые слова:

Торф, Западная Сибирь, редкоземельные элементы, формы нахождения, условия накопления.

### Введение

Формы нахождения химических элементов являются важным показателем условий образования торфяных залежей, природы формирования в них геохимических аномалий, важным фактором, позволяющим оценить условия накопления элементов-примесей в углях на ранних стадиях углеобразовательного процесса.

Формы нахождения редких элементов в торфах, в отличие от углей, практически не изучены. Исследование лантаноидов в торфах долгое время было ограничено низкими их содержаниями и отсутствием аналитических методов с достаточно низкими пределами обнаружения – на уровне  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  %. Проблема определения форм нахождения элементов-примесей в торфе заключается не только в сложности распознавания отдельных их видов, но и в необходимости оценки соотношения (баланса) разных форм в конкретных типах торфа. Имеется весьма ограниченная информация о формах лантаноидов в торфе [1].

В настоящей работе сделана попытка обобщения полученных авторами представительных данных по формам нахождения лантаноидов в торфах различных месторождений Западной Сибири.

### Методика исследований

Формы нахождения редкоземельных элементов (РЗЭ) изучены с применением комплекса методов.

Для исследования роли органического и минерального вещества в концентрировании лантаноидов использованы стандартные методики разделения торфа на групповые составляющие. Групповой состав торфа изучали путем последовательной экстракции битумов, водорастворимых и легкогидролизующих веществ (ВРВ и ЛГВ), а также выделения гуминовых кислот (ГК), фульвокислот (ФК) и лигнино-целлюлозного остатка (ЛЦО) по методике Инсторфа [2]. Битумы извлекались путем экстракции из исходной пробы бензолом и спирто-толуольным раствором. Для извлечения ВРВ и ЛГВ

остаток обрабатывался слабым 4%-м раствором HCl в течение 5 часов на водяной бане. Нерастворимый остаток обработан 0,1N раствором NaOH на кипящей водяной бане в течение 1 часа при температуре 100 °С. После трехкратной обработки получали раствор смеси гуматов Na. Добавление соляной кислоты обуславливало замещение ионов Na<sup>+</sup> ионами H<sup>+</sup> и выпадение в осадок гуминовых кислот. Фульвокислоты при этом оставались в растворе. Раствор выпаривали с целью дальнейшего изучения. Часть массы полученных продуктов группового анализа использовали для определения содержания лантаноидов, другая часть озолялась при T=800 °С для определения зольности и получения золы для исследований. Определение содержания лантаноидов в гуминовых веществах проводилось для контроля. При расчетах баланса содержание элементов в гуминовых веществах определялось методом баланса по разнице содержаний в исходной пробе и в нерастворимом остатке.

Во всех групповых составляющих торфа исследовано содержание La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb и Lu и выполнены балансовые расчеты. Выделенные фракции изучались методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университе-

та (ТПУ) (аналитик А.Ф. Судыко). Облучение проб потоком нейтронов выполнено на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т Физико-технического института ТПУ. Контроль качества осуществляли параллельным исследованием исходной пробы и ее зольного остатка, полученного при озонировании пробы при 800 °С, а также путем использования стандартных образцов сравнения. Всего изучен групповой состав 21 пробы торфа.

Зольность исходных проб торфа и содержание в них лантаноидов показаны в табл. 1.

Минеральные формы нахождения РЗЭ в отдельных пробах торфа изучались в Международном инновационном научно-образовательном центре «Урановая геология» кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ на сканирующем электронном микроскопе «Hitachi S-3400N» с энергодисперсионным спектрометром «Bruker XFlash 4010». Эта методика позволяет идентифицировать и визуализировать минеральные формы микронной и нанометровой размерности, а также определять их элементный состав. Исследовано 15 образцов из торфяных залежей Березовая Грива, Колпашевского и Васюганского месторождений.

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

**Таблица 1.** Содержание лантаноидов и зольность исходных проб торфа

**Table 1.** Lanthanides content and ash content of the initial samples of peat

Месторождение Deposit	Проба (*) Sample (*)	Ad, %	Содержание элементов, г/т Element content, ppm						
			La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
Полуденовское/Poludenovskoe	679-2 (В)	1,4	0,75	2,5	0,14	0,069	0,012	0,048	0,018
Васюганское-5/Vasyuganskoe-5	397-1 (В)	1,9	1,45	2,9	0,18	0,06	0,019	0,081	0,012
	397-2 (П)	4,0	1,55	4,1	0,25	0,07	0,082	0,16	0,025
	397-3 (П)	5,1	1,59	3,9	0,24	0,07	0,058	0,12	0,016
	397-4 (П)	7,2	1,67	4,4	0,27	0,11	0,066	0,15	0,023
	397-5 (В)	3,3	1,13	3,0	0,19	0,06	0,041	0,085	0,016
	397-6 (П)	7,1	2,14	5,5	0,38	0,11	0,096	0,19	0,029
	397-7 (В)	1,5	1,05	2,5	0,17	0,05	0,024	0,10	0,019
Васюганское-22/Vasyuganskoe-22	397-9 (В)	1,3	1,04	2,4	0,24	0,05	0,031	0,11	0,023
	397-9-1 (В)	2,0	0,73	1,74	0,12	0,057	0,014	0,049	0,014
	397-11 (Н)	4,3	0,95	2,48	0,18	0,085	0,015	0,15	0,026
Югинское/Uginskoe	397-18 (В)	1,3	0,54	1,0	0,08	0,01	0,035	0,075	0,010
Айгарово/Aigarovo	496-1В (В)	1,5	0,73	1,75	0,14	0,007	0,017	0,080	0,010
	496-2В (В)	1,3	0,71	1,41	0,14	0,033	0,03	0,061	0,010
	496-3В (В)	2,0	1,36	3,19	0,25	0,072	0,019	0,13	0,021
	496-1Н (В)	2,8	1,96	5,85	0,49	0,11	0,11	0,18	0,030
	496-2Н (В)	2,6	1,72	3,78	0,34	0,076	0,051	0,17	0,028
	496-3Н (В)	10,9	3,88	9,60	0,88	0,16	0,12	0,45	0,064
Березовая Грива/Berezovaya Griva	817-5 (П)	5,6	5,60	11,7	1,13	0,33	0,13	0,29	0,056
Гусевское/Gusevskoe	902-6 (Н)	8,3	1,29	1,24	0,16	0,11	0,017	0,11	0,019
Колпашевское/Kolpashevskoe	542-2 (В)	6,4	3,15	6,97	0,89	0,18	0,10	0,27	0,037

Примечание: \* – тип торфа: В – верховой, П – переходный, Н – низинный.

Note: \* – peat type: В – high-moor, П – transitional, Н – lowland.

### Результаты исследований и их обсуждение

Наличие углей, в золах которых установлены концентрации редкоземельных элементов, достигающие в сумме 0,2–1,0 % [1, 3–17], при их содержании в углевещающих породах 100–200 г/т, предполагает существование фазы – концентрата элементов. Таковой может быть минеральное или органическое вещество угля. При этом, как показывают исследования, соотношение форм нахождения элементов может существенно изменяться в процессе углефикации [1, 18]. Поэтому рационально рассмотреть условия накопления и связанные с ними формы нахождения лантаноидов на ранней стадии углеобразования – на стадии торфообразования.

В современных торфах северной Евразии содержание лантаноидов, как правило, существенно ниже, чем в углях, хотя уровни концентрирования их в золе торфа часто сопоставимы с содержанием в золах углей [19–21]. На севере Европы в Финляндии известны торфяники, в которых содержание суммы легких лантаноидов (La, Ce, Pr, Nd, Sm) в золе торфа в среднем для месторождения превышает 0,1 %, а на отдельных участках достигает 0,5 % [22]. При этом в подстилающих гранитах и гнейсах содержание лантана ниже, чем в торфе, и более чем на порядок ниже, чем в золе изученных торфов. Поэтому с некоторыми допущениями современные торфяники северного полушария можно рассматривать в качестве предшественников углей, а характер распределения в них металлов принять за таковой для древних торфяников.

Формы нахождения лантаноидов в торфе можно оценить по результатам исследования группового состава торфа. С этой целью был изучен групповой состав 21 пробы торфа из 8 месторождений юго-восточной части Западно-Сибирской плиты.

Полученные результаты свидетельствуют, что основным носителем и концентратом лантаноидов в торфе является фракция водорастворимых и легкогидролизуемых веществ, на которую приходится от 30 до 80 % от общего содержания элементов в пробе, в среднем более 50 % как для верхового, так и для низинного торфа (табл. 2).

Слабая соляная кислота, используемая для извлечения легкогидролизуемых веществ, хорошо растворяет сульфаты и карбонаты, а также некоторые железистые алюмосиликаты, не затрагивая пирита [23]. Эксперименты показывают, что при обработке торфа слабой (4% -й) соляной кислотой отщепляются и переходят в раствор помимо других органических соединений и аминокислоты: аспаргиновая кислота (63 % от ее содержания), глицин (60 %) и метионин (59 %) [24]. Другие аминокислоты отщепляются в более жестких условиях. Аминокислоты и аминокислоты способны образовывать растворимые хелатные комплексные соединения анионного типа с редкоземельными металлами. Это их свойство широко используются

в технологической практике переработки редкоземельного сырья [25]. Их можно рассматривать в качестве одной из возможных форм нахождения РЗЭ во фракции легкогидролизуемых и водорастворимых веществ торфа. Хорошими комплексообразователями являются аспаргиновая и аминокислоты (глицин) кислоты, нередко применяемые для хроматографического разделения редкоземельных металлов. Следовательно, во фракции водорастворимых и легкогидролизуемых веществ РЗЭ могут находиться не только в ионной форме или в виде хлоридных комплексов, но и в составе комплексных органических соединений, таких как аминокислоты, участвующие в дальнейшем в процессе образования фульвовых, а затем и гуминовых кислот.

**Таблица 2.** Выход лантаноидов во фракции группового состава верхового, переходного и низинного торфа, %

**Table 2.** Yield of lanthanides in the group composition fraction of high-moor, transitional and lowland peat, %

Групповой состав торфа Group composition of peat	Выход фракций, % Yield of fractions, %	Выход элементов во фракции, % Yield of elements in the fraction, %						
		La	Ce	Sm	Eu	Yb	Lu	Среднее Mean
Верховой торф малой степени разложения (3 пробы) Low-decomposition high-moor peat (3 samples)								
Битум Bitumen	4,1	<0,1						
ВРВ и ЛГВ Water-soluble and readily hydrolyzable substances	45,7	58,1	59,5	59,1	57,6	44,5	42,7	53,7
Гуминовые кислоты Humic acids	31,9	11,2	9,1	11,4	18,3	18,7	19,0	14,6
Нерастворимый остаток Insoluble residue	18,3	30,9	31,7	29,5	24,1	37,8	39,3	32,2
Верховой торф высокой степени разложения (3 пробы) High-decomposition high-moor peat (3 samples)								
Битум Bitumen	4,0	1,8	2,0	1,7	1,3	2,7	1,6	1,8
ВРВ и ЛГВ Water-soluble and readily hydrolyzable substances	33,6	55,3	58,2	58,8	63,0	51,0	43,9	55,0
Гуминовые кислоты Humic acids	42,5	21,1	21,8	22,9	16,6	27,8	32,2	23,7
Нерастворимый остаток Insoluble residue	15,2	19,3	18,6	12,5	18,4	18,7	21,4	18,2

Величины лантан-иттербиевых отношений и данные о выходе элементов во фракции, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о преимущественном накоплении в этой фракции легких и средних лантаноидов.

Это все подвижные формы элементов, которые можно рассматривать как потенциал для формирования в процессе углефикации минеральных форм и органоминеральных комплексов.

Относительно выдержан для разных торфяников процент выхода остаточной фракции (нерастворимый остаток). Он состоит из лигнина, целлюлозы, минерального вещества, а также других нерастворимых в NaOH и HCl органических веществ типа гуминов. Из балансовых расчетов следует, что на собственные минеральные формы, устойчивые к воздействию 4% -й соляной кислоты, приходится не более 30–40 % от суммы редких земель в торфе (табл. 2, 3).

**Таблица 3.** Выход лантаноидов во фракции группового состава верхового торфа месторождения Айгарово, %

**Table 3.** Yield of lanthanides in the group composition fraction of high-moor peat of Aigarovo deposit, %

Групповой состав торфа Group composition of peat	Выход фракций, % Yield of fractions, %	Выход элементов во фракции, % Yield of elements in the fraction, %						
		La	Ce	Sm	Eu	Yb	Lu	Среднее Mean
Верховой торф малой степени разложения (3 пробы) Low-decomposition high-moor peat (3 samples)								
Битум Bitumen	3,7	2,7	2,2	3,1	0,7	1,7	0,1	1,8
ВРВ и ЛГВ Water-soluble and readily hydrolyzable substances	50,1	51,5	51,1	51,3	58,8	36,1	37,7	47,7
Гуминовые кислоты Humic acids	31,2	9,6	8,9	10,5	10,3	15,0	16,7	11,8
Нерастворимый остаток Insoluble residue	15,0	36,2	37,8	35,1	30,2	47,2	45,5	38,7
Верховой торф высокой степени разложения (3 пробы) High-decomposition high-moor peat (3 samples)								
Битум Bitumen	5,8	4,0	3,9	3,5	1,9	3,6	4,2	3,5
ВРВ и ЛГВ Water-soluble and readily hydrolyzable substances	34,0	68,0	66,0	62,1	62,6	56,0	53,3	61,3
Гуминовые кислоты Humic acids	43,4	4,4	6,3	11,1	10,1	12,7	12,8	9,6
Нерастворимый остаток Insoluble residue	16,8	23,6	23,7	23,3	25,4	27,7	29,7	25,6

Характерно, что изученный верховой и низинный торф различаются распределением лантаноидов по фракциям. Несмотря на более высокую зольность низинного торфа по сравнению с верховым (в данном случае 4,0–8,3 % для низинного и переходного типа и 1,3–4,0 % для верхового), органико-минеральный остаток верхового торфа несет в себе значительно большую долю суммы лантаноидов

по сравнению с нерастворимым остатком низинного торфа. В верховом торфе в среднем в остаточной фракции сконцентрировано 32,2 % лантаноидов, а в низинном – только 18,2 % (табл. 2). Данный факт указывает на подчиненную роль минеральной формы в концентрировании в торфе как отдельных лантаноидов, так и их суммы. Особенно отчетливо это видно на примере верхового торфа разной степени разложения, изученного не в среднем по региону, а в пределах одного месторождения Айгарово (табл. 3). В этом случае нивелируется влияние различия областей питания торфяников и, следовательно, состав поступающего в торфяник минерального вещества более однороден. Из этих данных следует, что при увеличении степени разложения органического вещества, несмотря на возрастание выхода неорганического остатка, доля его в балансе лантаноидов снижается в 1,5 раза. Баланс изменяется в сторону возрастания роли водорастворимых и легкогидролизуемых веществ.

Согласно этим данным, если даже допустить, что все лантаноиды в остаточной фракции сконцентрированы в минералах, на минеральное вещество торфа в целом приходится не более 40 % от общего их количества. При этом исследование наиболее минерализованного низинного и переходного торфа показывает, что концентрации лантаноидов в остаточной фракции не более чем в 1,5 раза выше их содержания в исходном веществе торфа (табл. 4 и 5). Так как выход остаточной фракции в данном случае не превышает 20 % от массы пробы, эти результаты также подчеркивают подчиненное значение минеральной составляющей в накоплении РЗЭ в торфе.

Исследования торфа на высокоразрешающем электронном микроскопе позволили выявить лишь единичные содержащие РЗЭ минералы микронной размерности. Их количества недостаточно для компенсации даже того количества лантаноидов, что содержится в остаточной фракции исследованного торфа.

Можно предполагать, что часть РЗЭ концентрируется в остаточной фракции в нерастворимых в NaOH гуминах. Это предположение основано на пониженном по сравнению с исходным торфом La-Yb-отношении в этой фракции. Отношение резко понижено в гуминовых и фульвокислотах и в меньшей степени – в остаточной фракции. Вероятно, в остаточной фракции имеет место смещение органической (низкое La/Yb) и минеральной (высокое La/Yb) формы нахождения лантаноидов. Приняв величину лантан-иттербиевого отношения для минерального вещества, равную отношению в верхней континентальной земной коре [26] – 12,8, можно ориентировочно рассчитать долю минеральной составляющей в общем балансе РЗЭ в остаточной фракции торфа. Для региона в среднем (табл. 5) она составляет: 17 % – для верхового торфа; 25 % – для низинного. Для месторождения Айгарово – это 28 % для торфа малой степени раз-

**Таблица 4.** Среднее содержание лантаноидов (г/т) и La/Yb-отношение во фракциях группового состава торфа месторождения Айгарово

**Table 4.** Average content of lanthanides (ppm) and La/Yb ratio in fractions of the group composition of peat of Aigarovo deposit

Групповой состав торфа Group composition of peat	Выход фракций, % Yield of fractions, %	La	Ce	Sm	Eu	Yb	Lu	La/Yb
Верховой торф малой степени разложения (3 пробы)/Low-decomposition high-moor peat (3 samples)								
Исходный торф/Initial peat	100	0,89	1,94	0,17	0,048	0,10	0,014	8,9
Битум/Bitumen	3,7	<0,05		<0,01			<0,005	Н.д.
ВРВ и ЛГВ/Water-soluble and readily hydrolyzable substances	50,1	1,0	2,4	0,19	0,065	0,09	0,011	11,1
Гуминовые кислоты/Humic acids	31,2	0,25	0,34	0,05	0,015	0,06	0,007	4,3
Нерастворимый остаток/Insoluble residue	15,0	2,1	4,4	0,38	0,084	0,31	0,044	6,7
Верховой торф высокой степени разложения (3 пробы)/High-decomposition high-moor peat (3 samples)								
Исходный торф/Initial peat	100	2,7	6,3	0,55	0,13	0,29	0,042	9,3
Битум/Bitumen	5,8	<0,05		<0,01			<0,005	Н.д.
ВРВ и ЛГВ/Water-soluble and readily hydrolyzable substances	34,0	6,4	14,0	1,0	0,26	0,34	0,067	18,6
Гуминовые кислоты/Humic acids	43,4	0,26	0,86	0,16	0,027	0,085	0,011	3,0
Нерастворимый остаток/Insoluble residue	16,8	3,8	9,1	0,71	0,20	0,51	0,076	7,6

Примечание: Н.д. – нет данных.

Note: Н.д. is not available.

ложения и 47 % для торфа высокой степени разложения. Неопределенность таких расчетов обусловлена сложностью выбора La/Yb для исходного минерального вещества. Но даже если за основу взять современное отношение в исходном торфе, доля минеральной формы в общем балансе редкоземельных элементов в остаточной фракции не превысит 65 %. С учетом выхода этой фракции в целом для торфа Западной Сибири доля минеральной формы в общем балансе РЗЭ не превышает 25 %.

Весьма показательно, что в наиболее обогащенном лантаноидами образце торфа из месторождения Березовая Грива (табл. 1) на остаточную фракцию приходится всего 3–6 % от общего их количе-

ства (табл. 6). Основная масса РЗЭ здесь сконцентрирована в составе фракции водорастворимых и легкогидролизуемых веществ. В процессе диагенеза в результате изменения состава торфа они могут войти в состав формирующихся гуматных комплексов либо аутигенных минералов.

Таким образом, все эти данные свидетельствуют о второстепенной роли минеральных форм нахождения РЗЭ в торфе.

В отличие от скандия и тория [18, 27], в концентрировании лантаноидов высокомолекулярные гумусовые кислоты (гуминовые и фульвокислоты) торфа в основном не играют ведущей роли. В редких случаях их доля в общем балансе элемента достигает 50 %, но обычно колеблется в преде-

**Таблица 5.** Среднее содержание лантаноидов (г/т) и La/Yb-отношение во фракциях группового состава торфа (средние оценки для региона)

**Table 5.** Average content of lanthanides (ppm) and La/Yb ratio in fractions of the group composition of peat (average estimates for the region)

Групповой состав торфа Group composition of peat	Выход фракций, % Yield of fractions, %	La	Ce	Sm	Eu	Yb	Lu	La/Yb
Верховой торф (14 проб)/High-moor peat (14 samples)								
Исходный торф/Initial peat	100	1,5	3,5	0,31	0,10	0,15	0,065	10,2
Битум/Bitumen	4,1	<0,05		<0,01			<0,005	Н.д.
ВРВ и ЛГВ/Water-soluble and readily hydrolyzable substances	45,7	2,6	5,9	0,49	0,14	0,16	0,091	16,0
Гуминовые кислоты/Humic acids	31,9	0,68	1,26	0,11	0,09	0,11	0,018	6,4
Нерастворимый остаток/Insoluble residue	18,3	2,1	5,02	0,37	0,10	0,27	0,062	7,9
Низинный и переходный торф (7 проб)/Lowland and transitional peat (7 samples)								
Исходный торф/Initial peat	100	1,9	4,5	0,38	0,12	0,18	0,028	10,7
Битум/Bitumen	4,0	<0,05		<0,01			<0,005	Н.д.
ВРВ и ЛГВ/Water-soluble and readily hydrolyzable substances	33,6	3,1	9,4	0,80	0,25	0,31	0,038	10,0
Гуминовые кислоты/Humic acids	42,5	0,85	2,0	0,18	0,05	0,11	0,019	6,5
Нерастворимый остаток/Insoluble residue	15,2	2,2	5,5	0,27	0,13	0,21	0,035	10,2

Примечание: Н.д. – нет данных.

Note: Н.д. is not available.

**Таблица 6.** Выход лантаноидов во фракции группового состава торфа месторождений Березовая Грива и Колпашевское, %

**Table 6.** Yield of lanthanides in the group composition fraction of peat of Berезovaya Griva and Kolpashevskoe deposits, %

Групповой состав торфа Group composition of peat	Выход фракций, % Yield of fractions, %	Выход элементов во фракции, % Yield of elements in the fraction, %					
		La	Ce	Sm	Eu	Yb	Lu
817-5 (Березовая Грива) / 817-5 (Berезovaya Griva)							
Исходный торф Initial peat	100						
Битум Bitumen	3,1	0,1	0,4	0,3	0,1		
ВРВ и ЛГВ Water-soluble and readily hydrolyzable substances	46,0	79,4	90,1	91,3	82,7	73,2	74,4
Гуминовые кислоты Humic acids	35,6	5,1	4,0	5,1	7,0	20,5	21,2
Нерастворимый остаток Insoluble residue	15,3	5,4	5,8	3,2	10,0	5,7	4,3
542-2 (Колпашевское) / 542-2 (Kolpashevskoe)							
Исходный торф Initial peat	100						
Битум Bitumen	4,5	1,2	0,5	3,5	4,5	1,2	1,4
ВРВ и ЛГВ Water-soluble and readily hydrolyzable substances	44,4	77,1	78,6	84,6	74,7	60,2	61,3
Гуминовые кислоты Humic acids	38,1	11,9	9,6	5,8	11,9	27,0	30,8
Нерастворимый остаток Insoluble residue	13,0	9,8	11,3	6,1	8,8	11,6	6,5

лах 10–25 % (табл. 2 и 3). При этом тяжелые лантаноиды (Yb, Lu) накапливаются в гуминовых кислотах активнее, чем легкие. Об этом свидетельствуют и большой процент выхода их в данную фракцию, и пониженное La/Yb в гуминовых кислотах. Лантан-иттербиевое отношение в торфе в целом близко к кларковой величине, что свидетельствует о преимущественно кластогенном поступлении лантаноидов в торфяник. Уже в торфянике происходит растворение и частичное перераспределение редкоземельных элементов. В гуминовых и фульвокислотах концентрируются преимущественно тяжелые лантаноиды, а во фракции водорастворимых и легкогидролизуемых веществ – легкие. На это указывает La-Yb-отношение. Особенно наглядно это видно на примере верхового торфа месторождения Айгарово (табл. 4). При величине La-Yb-отношения в торфе около 9 во фракции ВРВ и ЛГВ оно составляет 18,6 для торфа высокой степени разложения и 11,1 для торфа низкой степени разложения, а во фракции гуминовых кислот – 3,0 и 4,3 соответственно. Еще мень-

**Таблица 7.** Содержание лантаноидов в золе исходных проб торфа и в золе извлеченных из них гуминовых кислот, г/т

**Table 7.** Content of lanthanides in ashes of initial peat and in ashes of the humic acids, ppm

Объекты исследования Survey items	Содержание элементов, г/т Element content, ppm							La/Yb
	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	
Месторождение Колпашевское 542-2 / Kolpashevskoe deposit 542-2								
Зола торфа Peat ash	49,2	108,9	13,9	2,9	1,50	4,2	0,57	11,7
Зола гуминовых кислот/НА ash	72,3	109,7	7,8	<0,2	2,30	12,8	1,61	5,6
Коэффициент концентрации* Coefficient of concentration*	1,5	1,0	0,6	0,03	1,5	3,1	2,8	
Месторождение Айгарово 496-3В / Aigarovo deposit 496-3В								
Зола торфа Peat ash	37,8	83,4	6,1	1,7	0,7	3,4	0,5	11,1
Зола гуминовых кислот/НА ash	48,2	90,4	8,5	2,3	1,3	6,8	1,0	7,1
Коэффициент концентрации Coefficient of concentration	1,3	1,1	1,4	1,3	1,7	2,0	1,9	
Месторождение Айгарово 496-2Н / Aigarovo deposit 496-2Н								
Зола торфа Peat ash	58,8	101	10,4	2,2	1,3	4,3	0,96	13,7
Зола гуминовых кислот/НА ash	64,9	79	14,8	2,8	2,5	12,7	2,5	5,1
Коэффициент концентрации Coefficient of concentration	1,1	0,8	1,4	1,2	1,9	3,0	2,6	
Месторождение Васюганское 397-9 / Vasyuganskoe deposit 397-9								
Зола торфа Peat ash	31,2	62,7	4,8	1,5	0,69	2,5	0,49	12,5
Зола гуминовых кислот/НА ash	71,2	115	11,9	3,2	1,13	10,3	2,61	6,9
Коэффициент концентрации Coefficient of concentration	2,3	1,8	2,5	2,1	1,6	4,1	5,3	
Месторождение Гусевское 902 / Gusevskoe deposit 902								
Зола торфа Peat ash	12,4	8,8	0,8	1,3	0,21	1,34	0,18	9,3
Зола гуминовых кислот/НА ash	55,3	99,8	2,8	6,2	3,5	10,8	1,5	5,1
Коэффициент концентрации Coefficient of concentration	4,5	11,3	3,5	4,8	16,8	8,1	8,2	
Среднее для месторождений торфа / Average for peat deposit								
Зола торфа Peat ash	37,8	70,2	7,1	1,8	1,0	3,0	0,5	12,4
Зола гуминовых кислот/НА ash	52,5	92,8	9,3	3,3	2,2	10,0	1,6	5,3
Коэффициент концентрации Coefficient of concentration	1,4	1,3	1,3	1,9	2,1	3,3	3,0	

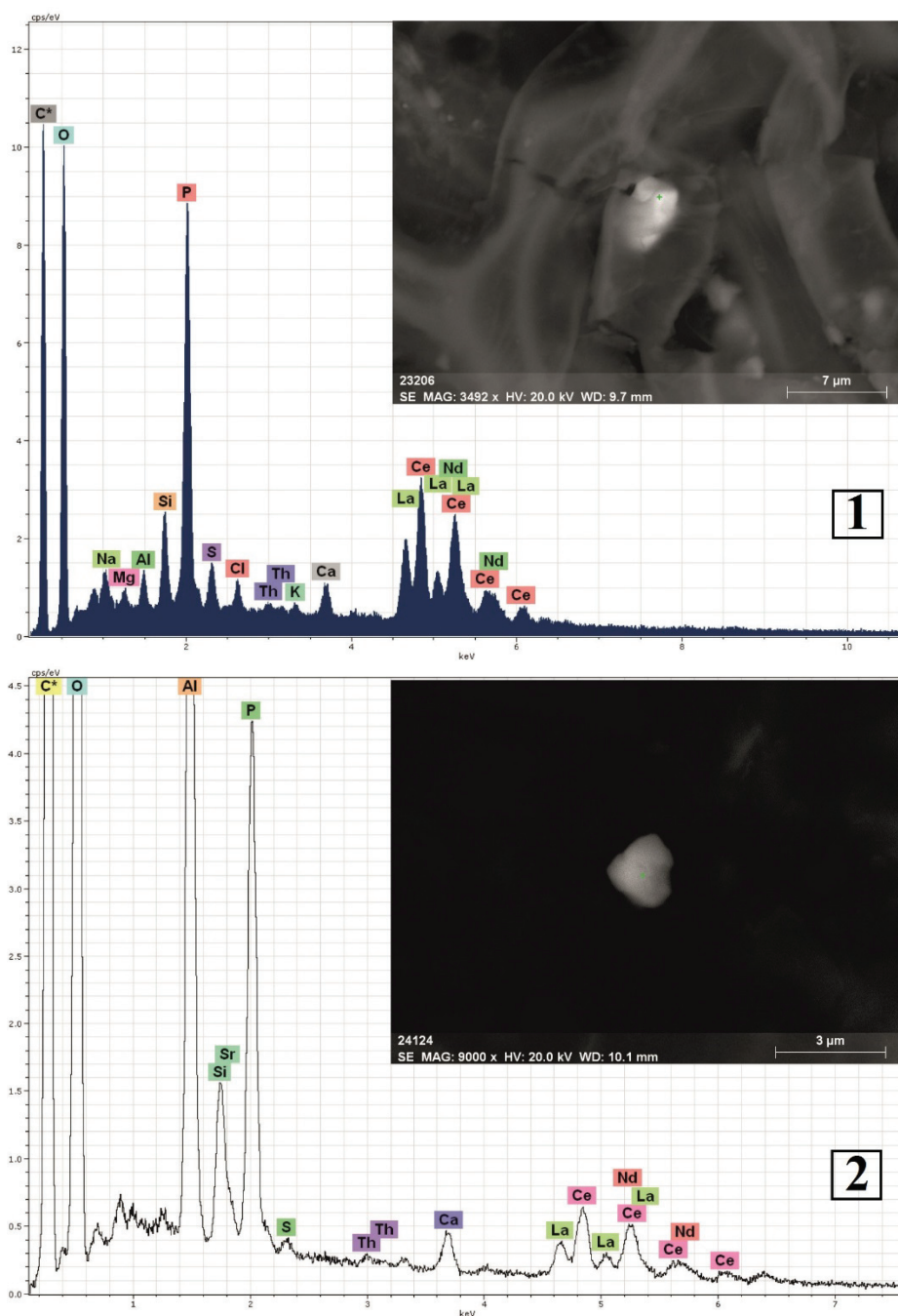
Примечание. Коэффициент концентрации\* – отношение содержания элемента в золе гуминовых кислот к его содержанию в исходной пробе торфа.

Note. Coefficient of concentration\* is the ratio of element content in humic acids ashes and its content in initial peat.

шие величины La-Yb-отношений характерны для некоторых типов фульвокислот. И хотя в целом гуминовые вещества изученных проб торфа не являются ни концентраторами, ни носителями редкоземельных элементов, в их составе избирательно накапливаются тяжелые лантаноиды. Содержание Yb и Lu в золе гуминовых кислот в 2–8 раз выше, чем в золе исходного торфа (табл. 7). В более высокозольном низинном торфе месторождения Гусевское зола гуминовых кислот резко обогащена Ce и Tb. В среднем для изученных проб коэффици-

ент концентрации отдельных лантаноидов в золе гуминовых кислот по отношению к золе исходного торфа колеблется от 1,2 до 3,7 при частных значениях от 0,6 до 16,8 (табл. 7).

Отмечается слабовыраженная тенденция относительного увеличения содержания как легких так и тяжелых лантаноидов в гуминовых кислотах (увеличение коэффициентов концентрации по отношению к исходному торфу) с увеличением зольности исходного торфа. Выход гуминовых веществ возрастает с увеличением степени разложения, а

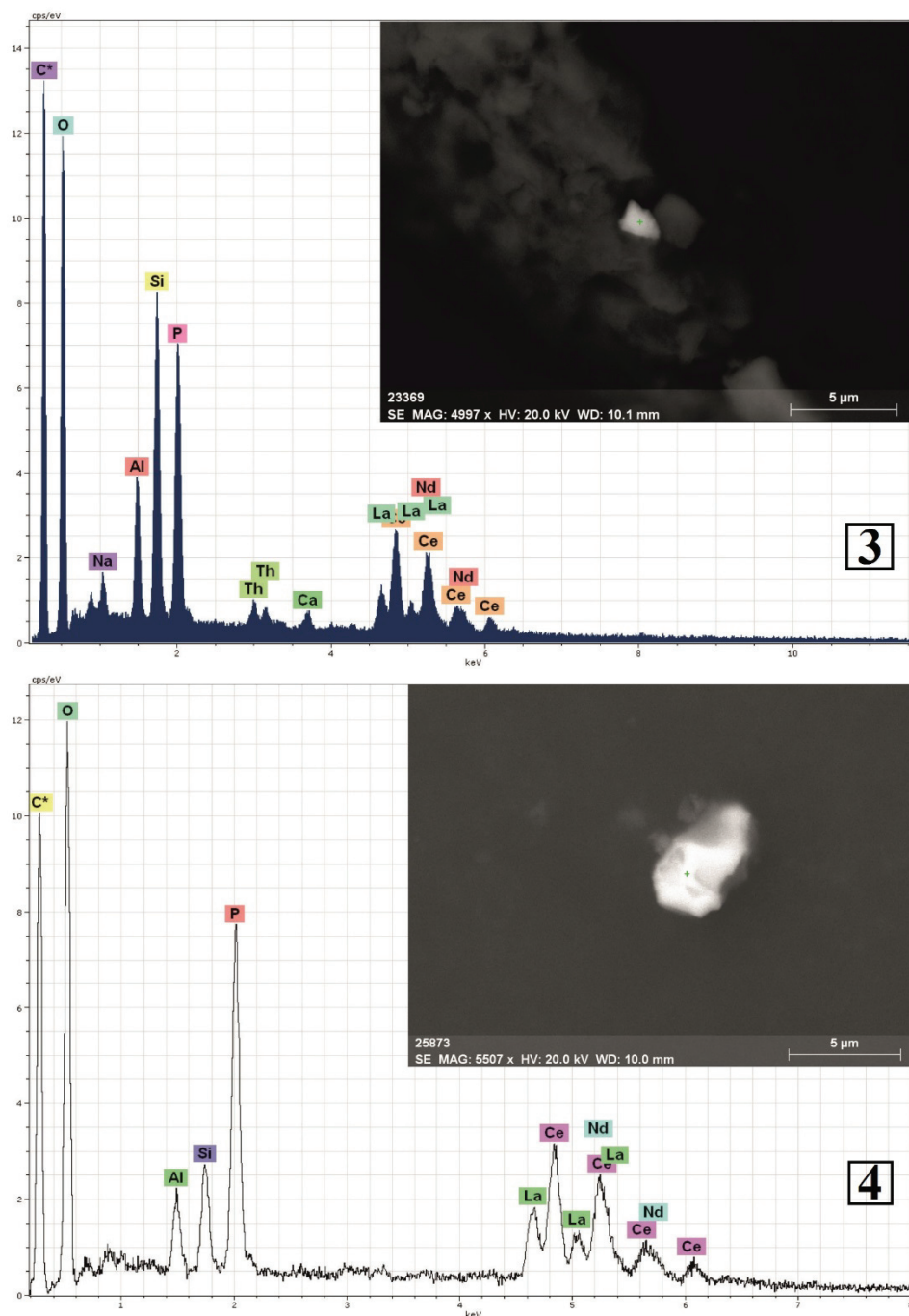




следовательно, и зольности торфов. По данным П.П. Тимофеева и Л.И. Боголюбовой [28], большое влияние на образование гуминовых веществ оказывает климат. В условиях тропического и субтропического климата ускоряются процессы конденсации водорастворимых и легкогидролизуемых веществ и синтез из них фульвокислот, а из последних – гуминовых кислот. Следовательно, можно

предполагать, что в формировавшихся в более теплых климатических условиях древних торфяниках роль гуминовых веществ в накоплении РЗЭ была существенно выше, чем у изученных нами современных аналогов.

Таким образом, анализ содержания РЗЭ во фракциях группового состава торфа показал, что основная масса металлов сконцентрирована во



**Рисунок.** Минералы редкоземельных элементов в торфе и их элементный состав: 1 – монацит; 2 – гойяцит; 3 – монацит в Al-Si матрице; 4 – куларит

**Figure.** Minerals of rare earth elements in peat and their element composition: 1 is monazite; 2 is goyazite; 3 is monazite in Al-Si matrix; 4 is kularite

фракции водорастворимых и легкогидролизующихся веществ и в меньшей степени – в нерастворимом остатке и в гуминовых веществах. В нерастворимом остатке содержится не более 30–40 % от общего количества редкоземельных элементов в торфе. При этом на минеральную форму приходится не более 25 %. В более обогащенных лантаноидами торфах выход их в остаточную фракцию наименьший. Это свидетельствует о том, что на стадии торфонакопления роль собственных минеральных форм нахождения РЗЭ в низкосолевых и нормальносолевых торфах второстепенна. Вероятно, преобладают органические формы нахождения элементов и, возможно, физическая сорбция на глинистых минералах.

Некоторое количество устойчивых минеральных фаз (монацит, ксенотим, циркон, минералы группы крандаллита) может иметь первичное кластогенное происхождение. На это указывает наличие отдельных тонкодисперсных редкоземельных минералов в современном торфе (рисунок).

Условия формирования торфяников, особенно при образовании малосолевого верхового торфа, неблагоприятны для накопления тяжелых минералов, характерных для россыпей. Тонкодисперсные фазы минералов РЗЭ могут поступать в торфяники в виде пылеаэрозолей и тонких взвесей [29]. Ожидать сколько-нибудь значительного поступления РЗЭ в палеоторфяник с суходолов по такому механизму не приходится. В отдельных случаях возможен привнос лантаноидов с вулканическим пеплом, распространяющимся при крупных извержениях на значительные расстояния.

Аутигенные минералы, содержащие лантаноиды, в торфе пока не установлены. Однако их формирование вполне реально. В торфяниках хорошо известны фосфаты (торфовиванит), карбонаты (сидерит), сульфиды (пирит) и другие минеральные новообразования [30].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
2. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. – 320 с.
3. Geochemistry and petrography of the Mattagami Formation lignites (Northern Ontario) / B.I. Kronberg, F.N. Murray, W.S. Fyfe, C.G. Winder, J.R. Brown, M. Powell // Coal Science and Chemistry / Ed. by A. Volborth. – Amsterdam: Elsevier, 1987. – P. 245–263.
4. Середин В.В. О новом типе редкоземельного оруденения кайнозойских угленосных впадин // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 320. – № 6. – С. 1446–1450.
5. Seredin V.V. Major regularities of the REE distribution in coal // Doklady Earth Sciences. – 2001. – V. 377. – P. 250–253.
6. Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky // International Journal of Coal Geology. – 1999. – V. 39. – P. 141–153.

#### Выводы

При торфонакоплении РЗЭ в основном концентрируются во фракции водорастворимых и легкогидролизующихся веществ, отчасти, возможно, в аминокислотах и в подчиненном количестве – в гуминовых веществах, составляя в сумме более 60–80 %. В негидролизующем остатке группового состава торфа редкоземельные элементы также частично могут находиться в органическом веществе в составе нерастворимых в NaOH гуминов. Следовательно, на этапе торфонакопления резко преобладают подвижные формы нахождения РЗЭ. Среди них значительна доля органических соединений. Минеральное вещество не играет существенной роли в накоплении лантаноидов в торфе, хотя и присутствует в форме устойчивых РЗЭ минералов (монацит, ксенотим, циркон, минералы группы крандаллита). Отмечено разделение легких и тяжелых лантаноидов во фракциях группового состава торфа. Фракция водорастворимых и легкогидролизующихся веществ относительно обогащается легкими редкими землями, а гуминовые вещества – тяжелыми.

Формы нахождения РЗЭ в торфах свидетельствуют о том, что их концентрирование в угле обусловлено ведущей ролью гидрогенного механизма. Независимо от источника поступления в бассейны угленакопления, лантаноиды в условиях агрессивной среды торфяника в основной массе переходят в подвижную форму и в конечном итоге накапливаются в органическом веществе.

Роль подвижных и органических форм нахождения лантаноидов в торфах следует учитывать при разработке технологии комплексного использования торфа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00405А и № 16-35-00472 мол.а.*

*Авторы выражают благодарность Виктору Сергеевичу Архипову за конструктивную критику и предложения по улучшению статьи.*

7. Mardon S.M., Hower J.C. Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: examples from a Kentucky power plant // Int. J. of Coal Geol. – 2004. – V. 59. – P. 153–169.
8. A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran / F. Goodarzi, H. Sanei, L.D. Stasiuk, H. Bagheri-Sadeghi, J. Reyes // International Journal of Coal Geology. – 2006. – V. 65. – P. 35–50.
9. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types // International Journal of Coal Geology. – 2008. – V. 76. – P. 253–289.
10. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 94. – P. 67–93.
11. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies / V.V. Seredin, S. Dai, Y. Sun, I.Yu. Chekryzhov // Applied Geochemistry. – 2013. – V. 31. – P. 1–11.
12. A new type of Nb (Ta)–Zr (Hf)–REE–Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwest-

- tern China: Possible economic significance and genetic implications / S. Dai, Y. Zhou, M. Zhang, X. Wang, J. Wang, X. Song, Y. Jiang, Y. Luo, Z. Song, Z. Yang, D. Rena // *International Journal of Coal Geology*. – 2010. – V. 83. – № 1. – P. 55–63.
13. Revisiting the late Permian coal from the Huayingshan, Sichuan, southwestern China: Enrichment and occurrence modes of minerals and trace elements / S. Dai, Y. Luo, V.V. Seredin, C.R. Ward, J.C. Hower, L. Zhao, S. Liu, C. Zhao, H. Tian, J. Zou // *International Journal of Coal Geology*. – 2014. – V. 122. – P. 110–128.
  14. Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of Russia and South China): a review of geodynamic controls and styles of mineralization / S. Dai, I.Y. Chekryzhov, V.V. Seredin, V.P. Nechaev, I.T. Graham, J.C. Hower, C.R. Ward, D. Ren, X. Wang // *Gondwana Research*. – 2016. – V. 29. – P. 60–82.
  15. Редкометалльный потенциал углей Северной Азии (Сибирь, Российский Дальний Восток, Монголия) / С.И. Арбузов, В.С. Машенькин, В.И. Рыбалко, А.Ф. Судыко // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2014. – № 3с. – Ч. 2. – С. 41–44.
  16. Occurrence of some valuable elements in the unique high-aluminum coals from the Jungar coalfield, China / Y. Sun, C. Zhao, S. Qin, L. Xiao, Z. Li, M. Lin // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – V. 72. – P. 659–668.
  17. Maceral, mineralogical and geochemical characteristics of the Jurassic coals in Ningdong Coalfield, Ordos Basin / C. Zhao, B. Zhao, Z. Shi, L. Xiao, D. Wang, A.I. Khanchuk, V.V. Ivanov, M.G. Blokhin // *Energ. Explor. Exploit.* – 2014. – V. 32. – № 6. – P. 965–988.
  18. Modes of occurrence of uranium and thorium in coals and peats of Northern Asia / S.I. Arbutov, S.G. Maslov, A.V. Volostnov, S.S. Il'enok, V.S. Arkhipov // *Solid Fuel Chemistry*. – 2012. – V. 46. – № 1. – P. 52–66.
  19. Геохимия растений и торфов Большого Васюганского болота / В.К. Бернатонис, В.С. Архипов, М.А. Здвижков, Ю.И. Прейс, Н.О. Тихомирова // *Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития*. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 204–215.
  20. Среднее содержание некоторых элементов-примесей в торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты / С.И. Арбузов, В.С. Архипов, В.К. Бернатонис, В.А. Бобров, С.Г. Маслов, А.М. Межибор, Ю.И. Прейс, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко, А.И. Сысо // *Известия Томского политехнического университета. Науки о Земле*. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 44–48
  21. Mezhibor A.M., Arbutov S.I., Arkhipov V.S. Trace elements in peat bogs of Tomsk region (South Siberia, Russia) // *Energy Exploration and Exploitation*. – 2013 – V. 31. – № 4. – P. 629–644.
  22. Ylirokanen I., Lehto S. The occurrence of rare earth elements in some Finnish mires // *Bulletin of the Geological Society of Finland*. – 1995. – V. 67. – P. 2. – P. 27–38.
  23. Гуляева Л.А., Иткина Е.С. Микроэлементы углей, горючих сланцев и их битуминозных компонентов. – М.: Наука, 1974. – 92 с.
  24. Раковский В.Е., Пигулевская Л.В. Химия и генезис торфа. – М.: Недра, 1978. – 231 с.
  25. Михайличенко А.И., Михлин Е.Б., Патрикеев Ю.Б. Редкоземельные металлы. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
  26. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust // *Geochemistry International*. – 2003. – V. 41. – № 7. – P. 711–718.
  27. Arbutov S.I., Maslov S.G., Il'enok S.S. Modes of Occurrence of Scandium in Coals and Peats (a Review) // *Solid Fuel Chemistry*. – 2015. – V. 49. – № 3. – P. 167–182.
  28. Тимофеев П.П., Боголюбова Л.И. Геохимия органического вещества голоценовых отложений в областях приморского торфонакопления. – М.: Наука, 1999. – 220 с.
  29. Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимоненко Е.Ф. Вещественный состав нерастворимых частиц в снежном покрове на территории бассейна р. Томь // *Геология морей и океанов: материалы XXI международной научной конференции (школы) по морской геологии (Москва, 15–20 ноября 2015 г.)*. – М.: ГЕОС, 2015. – Т. III. – С. 123–127.
  30. Annual sulfate budgets for Dutch lowland peat polders: the soil is a major sulfate source through peat and pyrite oxidation / J.E. Vermaat, J. Harmsen, F.A. Hellmann, H.G. van der Geest, Jeroen J.M. de Klein, S. Kosten, Alfons J.P. Smolders, Jos T.A. Verhoeven, R.G. Mes, M. Ouboter // *Journal of Hydrology*. – 2016. – V. 533. – P. 515–522.

Поступила 06.04.2016 г.

#### Информация об авторах

**Арбузов С.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Маслов С.Г.**, кандидат технических наук, доцент кафедры химии твердого топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ильенок С.С.**, ассистент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Перегудина Е.В.**, ассистент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 552.42: 553.97

## MODES OF OCCURRENCE OF RARE EARTH ELEMENTS IN PEATS OF WEST SIBERIA

Sergey I. Arbuzov<sup>1</sup>,  
siarbuzov@mail.ru

Stanislav G. Maslov<sup>1</sup>,  
maslovsg@tpu.ru

Sergey S. Ilenok<sup>1</sup>,  
ilenokss@rambler.ru

Elena V. Peregudina<sup>1</sup>,  
pere-elena@mail.ru

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

**The relevance** of the study is determined by the necessity to distinguish the origin and to develop the models for accumulation of rare earth elements in peats and coals for forecasting and detecting rare metal mineralization in coalfields. The relevance is caused as well by the necessity of obtaining comprehensive information owing to peat integrated use in agricultural industry.

**The aim** of the research is to study the modes of occurrence and to assess the balance of rare earth elements modes of occurrence in peats of Western Siberia; to estimate the role of organic and mineral matter in accumulation of rare earth elements in high-bog and low-moor peats, and on this ground to define the nature of lanthanides accumulation in peats.

**Research methods:** peat division into group components by the Instorf method: bitums, water-soluble and hydrolyzable substances, humic and fulvic acids, non-hydrolyzable residue; investigation of rare earth elements content using neutron-activation analysis; REE balance calculation for fractions of group composition; scanning electronic microscopy using a Hitachi S-3400N microscope with energy dispersive spectrometer Bruker XFlash 4010 for studying mineral forms.

**Results.** The authors have singled out and studied the group components of peats. It was ascertained that the main mass of the REE in peats is related to the fraction hydrolyzable and water-soluble substances and organic matter. From 40 till 80 % of total content of REE in peat is accounted for the fraction of hydrolyzable and water-soluble substances. 10–30 % of the amount of REE is concentrated in humic acids. Mineral matter in peats plays a minor role in accumulation of lanthanides. In general, not more than 25 % is accounted for mineral substance in the rare earth elements balance in peats. Among the mineral forms of REE in peats phosphates (monazite, xenotime, crandallite) and zircon are dominated. The division of lanthanides in fractions of group compound of peat is noticed. The fraction of water-soluble and hydrolyzable substances is relatively enriched with light rare earths, and humic substances are enriched with heavy rare earths.

### Key words:

Peat, West Siberia, rare earth elements, modes of occurrence, conditions of formation.

*The paper was financially supported by the grants of RFBR 16–05–00405 A and 16–35–00472 мол.а.*

*The authors give thanks to Victor S. Arkhipov for useful criticism and article improvement proposals.*

### REFERENCES

1. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-Print Publ., 2007. 468 p.
2. Lishtvan I.I., Korol N.T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya* [Main properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 320 p.
3. Kronberg B.I., Murray F.N., Fyfe W.S., Winder C.G., Brown J.R., Powell M. Geochemistry and petrography of the Mattagami Formation lignites (Northern Ontario). *Coal Science and Chemistry*. Ed by A. Volborth. Amsterdam, Elsevier, 1987. pp. 245–263.
4. Seredin V.V. *O novom tipe redkozemel'nogo orudneniya kaynazoykikh uglenosnykh vpadin* [About a new type of REE mineralization of Cenozoic coal-bearing basins]. *Dokl. Akad. Nauk. USSR*, 1991, vol. 320, pp. 1446–1450.
5. Seredin V.V. Major regularities of the REE distribution in coal. *Doclady Earth Sciences*, 2001, vol. 377, pp. 250–253.
6. Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky. *International Journal of Coal Geology*, 1999, vol. 39, pp. 141–153.
7. Mardon S. M., Hower J. C. Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: examples from a Kentucky power plant. *International Journal of Coal Geology*, 2004, vol. 59, pp. 153–169.
8. Goodarzi F., Sanei H., Stasiuk L.D., Bagheri-Sadeghi H., Reyes J. A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran. *International Journal of Coal Geology*, 2006, vol. 65, pp. 35–50.
9. Seredin V.V., Finkelman R. B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*, 2008, vol. 76, pp. 253–289.
10. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 67–93.
11. Seredin V.V., Dai S., Sun Y., Chekryzhov I.Yu. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and ener-

- gy-efficient technologies. *Applied Geochemistry*, 2013, vol. 31, pp. 1–11.
12. Dai S., Zhou Y., Zhang M., Wang X., Wang J., Song X., Jiang Y., Luo Y., Song Z., Yang Z., Rena D. A new type of Nb (Ta)–Zr (Hf)–REE–Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: Possible economic significance and genetic implications. *International Journal of Coal Geology*, 2010, vol. 83, no. 1, pp. 55–63.
  13. Dai S., Luo Y., Seredin V.V., Ward C.R., Hower J.C., Zhao L., Liu S., Zhao C., Tian H., Zou J. Revisiting the late Permian coal from the Huayingshan, Sichuan, southwestern China: Enrichment and occurrence modes of minerals and trace elements. *International Journal of Coal Geology*, 2014, vol. 122, pp. 110–128.
  14. Dai S., Chekryzhov I.Y., Seredin V.V., Nechaev V.P., Graham I.T., Hower J.C., Ward C.R., Ren D., Wang X. Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of Russia and South China): a review of geodynamic controls and styles of mineralization. *Gondwana Research*, 2016, vol. 29, pp. 60–82.
  15. Arbuzov S.I., Mashenkin V.S., Rybalko V.I., Sudyko A.F. Redkometallny potentsial ugley Severnoy Azii (Sibir, Rossiyskiy Dalniy Vostok, Mongoliya) [Rare-metal potential of coal of the northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, Mongolia)]. *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri*, 2014, no. 3c, P. 2, pp. 41–44.
  16. Sun Y., Zhao C., Qin S., Xiao L., Li Z., Lin M. Occurrence of some valuable elements in the unique 'high-aluminum coals' from the Jungar coalfield, China. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 72, pp. 659–668.
  17. Zhao C.L., Zhao B., Shi Z.X., Xiao L., Wang D.H., Khanchuk A.I., Ivanov V.V., Blokhin M.G., Maceral M. Mineralogical and geochemical characteristics of the Jurassic coals in Ningdong Coalfield, Ordos Basin. *Energ. Explor. Exploit.*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 965–988.
  18. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Volostnov A.V., Il'enok S.S., Arkhipov V.S. Modes of occurrence of uranium and thorium in coals and peats of Northern Asia. *Solid Fuel Chemistry*, 2012, vol. 46, no. 1, pp. 52–66.
  19. Bernatonis V.K., Arkhipov V.S., Zdvizhkov M.A., Preys Yu.I., Tikhomirova N.O. Geokhimiya rasteniy i torfov Bolshogo Vasyuganskogo bolota [Geochemistry of plants and peat bogs of Bolshoe Vasyuganskoe boloto. *Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan. Current state and development]. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk, Institute of atmospheric optics Press, 2002. pp. 204–215.
  20. Arbuzov S.I., Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Bobrov V.A., Maslov S.G., Mezhibor A.M., Preys Yu.I., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F., Syso A.I. Average content of several elements admixtures in peats of south-east part of Western-Siberian plate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 44–48. In Rus.
  21. Mezhibor A.M., Arbuzov S.I., Arkhipov V.S. Trace elements in peat bogs of Tomsk region (South Siberia, Russia). *Energy Exploration and Exploitation*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 629–644.
  22. Yliruokanen I., Lehto S. The occurrence of rare earth elements in some Finnish mires. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 1995, vol. 67, P. 2, pp. 27–38.
  23. Gulyaeva L.A., Itkina E.S. *Mikroelementy ugley, goryuchikh slantsev i ikh bituminoznykh komponentov* [Trace elements of coal, oil shale and tar components]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 92 p.
  24. Rakovskiy V.E., Pigulevskaya L.V. *Khimiya i genezis torfa* [Chemistry and peat genesis]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 231 p.
  25. Mikhaylichenko A.I., Mikhlin E.B., Patrikeev Yu.B. *Redkozemelnye metally* [Rare earth metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 232 p.
  26. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*, 2003, vol. 41, no. 7, pp. 711–718.
  27. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Ilrenok S.S. Modes of Occurrence of Scandium in Coals and Peats (a Review). *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, no. 3, pp. 167–182.
  28. Timofeev P.P., Bogolyubova L.I. *Geokhimiya organicheskogo veshchestva golotsenovykh otlozheniy v oblostyakh primorskogo torfonakopleniya* [Geochemistry of organic matter of Holocene sediments in the seaside areas of peat accumulation]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 220 p.
  29. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A. Veshchestvenny sostav nerastvorimyykh chastits v snezhnom pokrove na territorii basseyna r. Tom. [Substantial composition of insoluble particles in snow within basin of river Tom]. *Geologiya morey i okeanov. Materialy XXI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (shkoly) po morskoy geologii* [Geology of seas and oceans. Proc. of the XXI International scientific conference (school) in marine geology]. Moscow, 15–20 November 2015. Moscow, GEOS Publ., 2015. Vol. III, pp. 123–127.
  30. Vermaat J.E., Harmsen J., Hellmann F.A., Van der Geest H.G., Jeroen J.M. de Klein, Kosten S., Alfons J.P. Smolders, Jos T.A. Verhoeven, R.G., Ouboter M. Annual sulfate budgets for Dutch lowland peat polders: the soil is a major sulfate source through peat and pyrite oxidation. *Journal of Hydrology*, 2016, vol. 533, pp. 515–522.

Received: 6 April 2016.

#### Information about the authors

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

**Stanislav G. Maslov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey S. Il'enok**, research assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Elena V. Peregudina**, research assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.21:549.02:553.679

## МИНЕРАЛЬНЫЕ МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ В ГЛАУКОНИТАХ БАКЧАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

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

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

Рева Игорь Витальевич<sup>1</sup>,  
igor\_1993@mail.ru

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

За счет своих уникальных свойств глауконит является ценным источником геологической информации. Как активный природный сорбент глауконит способен накапливать элементы в обстановке седиментации, которые впоследствии образуют новые минеральные фазы внутри глауконитовых гранул. **Актуальность исследования** определяется возможностью познания процессов осадкообразования на основе и посредством изучения созданного ими вещества в пределах Бакчарского месторождения.

**Цель работы:** изучение ультрадисперсных минеральных включений в глауконитах Бакчарского месторождения для характеристики минерального субстрата, поступающего в бассейн седиментации.

**Методы исследования:** разделение проб на гранулометрические классы размером более 1 мм, 1...0,5, 0,5...0,2, 0,2...0,1, менее 0,1 мм методом «мокрого» ситования; электромагнитная сепарация (ЭВС 10/5) при силе тока 4...2 А; очистка минеральных монофракций глауконита из магнитной фракции под бинокулярном; изготовление полированных шашек; сканирующая электронная микроскопия на оборудовании TESCAN VEGA 3 SBU с энергодисперсионной приставкой OXFORD X-Max50 для рентгенспектрального анализа.

В результате проведенных исследований в глауконитах Бакчарского месторождения были обнаружены микроскопические включения золота, серебра и некоторых других минералов (фосфатов, сульфидов, сульфатов, оксидов и силикатов). Минеральные ассоциации микровключений указывают на наличие в среде осадкообразования благородных, цветных и редких металлов. Предполагается, что глауконит как активный природный сорбент «загружался» металлами и терригенными ультрадисперсными компонентами на фоне сероводородного заражения осадка микроорганизмами. Эти условия способствовали образованию новых минеральных фаз сульфидов, сульфатов и золота. Полученные данные являются признаком потенциальной золотоносности глауконитовых пород Бакчарского месторождения.

### Ключевые слова:

Глауконит, золото, микровключения, сульфиды, Бакчарское месторождение.

### Введение

Глауконит – слоистый водный алюмосиликатный минерал переменного состава с условной формулой  $(K, Na, Ca)(Fe, Al, Mg, Mn)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$ , широко распространенный в осадочных породах [1–3]. За счет своих молекулярно-сорбционных и ионообменных свойств он является ценным источником палеоклиматической информации [1, 2, 4–10] а также минералом разнопланового промышленного использования. В настоящее время известно, что глаукониты являются активными природными сорбентами, благодаря чему они способны накапливать элементы в обстановке седиментации (in situ). Такая «загрузка» химическими элементами приводит к образованию новых минералов на фоне дигенетического преобразования осадков. Теоретически подобные процессы могут привести к формированию зон, обогащенных металлами, что уже предполагалось в работе [11]. С этой позиции детальные микроскопические исследования глауконитов позволяют расширить знания о составе материала, привносимого в бассейн, и тем самым реконструировать геохимический облик среды седиментации.

В данной работе изучались ультрадисперсные минеральные включения в глауконитах Бакчарского месторождения для характеристики минерального субстрата, поступающего в бассейн седиментации.

Объектом для исследований послужили верхнемеловые отложения Бакчарского месторождения. Глауконитовые породы формировались совместно с оолитовыми железными рудами. В прошлые десятилетия некоторыми учеными [12] в образцах оолитовых железных руд были обнаружены вышекларковые содержания золота (от 0,3...5,0 до 10...50 ppb) и платины (от 0,5...3,0 до 10...40 ppb). Однако попытки установить минеральные формы благородных металлов не увенчались успехом. Позже, при изучении оолитовых железных руд прецизионными методами (атомно-абсорбционный анализ, электронная микроскопия), данные о повышенном содержании золота и других благородных металлов в них не подтвердились [13].

Изучая аутигенную минерализацию мел-палеогеновых пород юго-восточной части Западной Си-

бири, авторы данной статьи предположили, что наличие или отсутствие золота и других редких металлов в этих отложениях можно установить при детальном исследовании глауконитов. Золото субмикронных размеров уже отмечалось в составе гидрослюд различных природных объектов [14–17], в том числе в палеогеновых отложениях юга Западной Сибири [18].

#### Фактический материал и методы исследования

Для исследований было отобрано 18 проб глауконитовых пород из керна скважин (рис. 1) с различных участков Бакчарского месторождения. Методом «мокрого» ситования выполнялось разделение проб на гранулометрические классы размером более 1 мм, 1,0...0,5 мм, 0,5...0,2 мм, 0,2...0,1 мм, менее 0,1 мм. Каждый гранулометрический класс разделялся на электромагнитном сепараторе (ЭВС 10/5) при силе тока 3,5...1,8 А на немагнитную (более 3,5 А), слабомагнитную (3,5...1,8 А) и магнитную (менее 1,8 А) фракции. Из магнитной и слабомагнитной фракций ручным способом (под биноклем) отбирались монофракции глауконита. Далее из монофракций изготавливались полированные шашки для изучения на электронном микроскопе. Шашка представляет собой множество зёрен глауконита, связанных и заполненных в оксидной матрице.

Все сделанные шашки изучались на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBU (минимальное разрешение 3 нм) с энергодисперсионной приставкой OXFORD X-Max 50.

Содержание золота в пробах определялось методом атомной абсорбции (Varian). Навеску пробы помещали в корундовый тигель и прокаливали в муфельной печи. Для вскрытия пробы добавляли фтористоводородную кислоту и упаривали до состояния влажного остатка. К остатку приливали свежеприготовленный раствор «царской водки», полученный раствор упаривали до объема 2–4 мл при температуре 180 °С. После чего к смеси добавляли концентрированную соляную кислоту, упаривали, а затем охлаждали и разбавляли до объема 10 мл 4М соляной кислотой. Концентрирование золота проводили экстракцией полученного раствора с ди-н-октил сульфидом в толуоле [19].

#### Краткая геологическая характеристика объекта исследований

Бакчарское месторождение находится в юго-восточной части Западной Сибири (рис. 1), в административном отношении в 200 км на северо-запад от г. Томска.

Глауконитовые толщи приурочены к верхнемеловым отложениям и залегают на глубинах 180...230 м (рис. 2) среди горизонтов осадочных железных руд, песчаников, алевролитов и глин. В изучаемом районе авторами выделяется три главных природных типа руд: сыпучие гидрогетитовые, сцементированные гидрогетит-хлорито-

вые, сцементированные сидерит-гидрогетитовые. Наибольшая доля глауконита связана со сцементированными гидрогетит-хлоритовыми рудами и нерудными песчаниками.

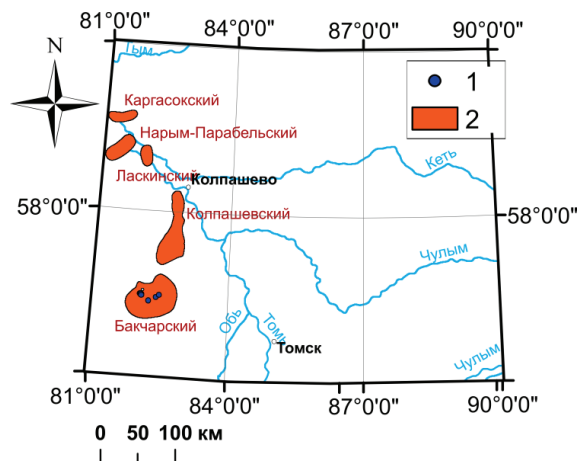


Рис. 1. Обзорная схема изучаемого района: 1 – скважины, из которых были отобраны пробы глауконитовых пород; 2 – железорудные районы

Fig. 1. Diagram of the studied area: 1 are the wells from which the samples of glauconite rocks were taken; 2 are the iron-ore areas

Содержание глауконита в породах и рудах достигает 20...90 %, остальное приходится на хлорит-гидрогетитовые оолиты, терригенные обломки и глинисто-глауконитовый цемент. Структура пород мелко-среднезернистая, наибольший средний выход (87 %) имеет гранулометрический класс 0,5...0,1 мм, в котором доля глауконита увеличивается до 40 %, а в некоторых породах – до 90 %.

Как известно, трансгрессия верхнемелового моря сопровождалась интенсивным образованием глауконитовых (а также фосфоритовых и железорудных) месторождений в пассивной континентальной окраине по всему миру [20–23], в том числе и на территории Западной Сибири.

Верхнемеловые и эоценовые осадки Бакчарского месторождения формировались в прибрежно-морской обстановке. Прибрежная зона мезозойского моря представляла собой систему мелководных валов и баров, в которой происходило распределение терригенных и хемогенных компонентов. Глауконитовые осадки, согласно разработанной авторами седиментационной модели [24], формировались преимущественно в седловидных и пологих участках морского дна, где, вероятно, происходило осаждение большей части ультрадисперсного вещества.

#### Результаты и их обсуждение

Подобно глауконитам бассейна Кавери в Индии [5], в верхнемеловых отложениях Бакчарского месторождения выделяются глауконитовые пеллеты, формирующиеся в результате изменения фекаль-



Рис. 2. Схематическая стратиграфическая колонка скважины Бакcharского месторождения и фотографии образцов глауконитовых пород

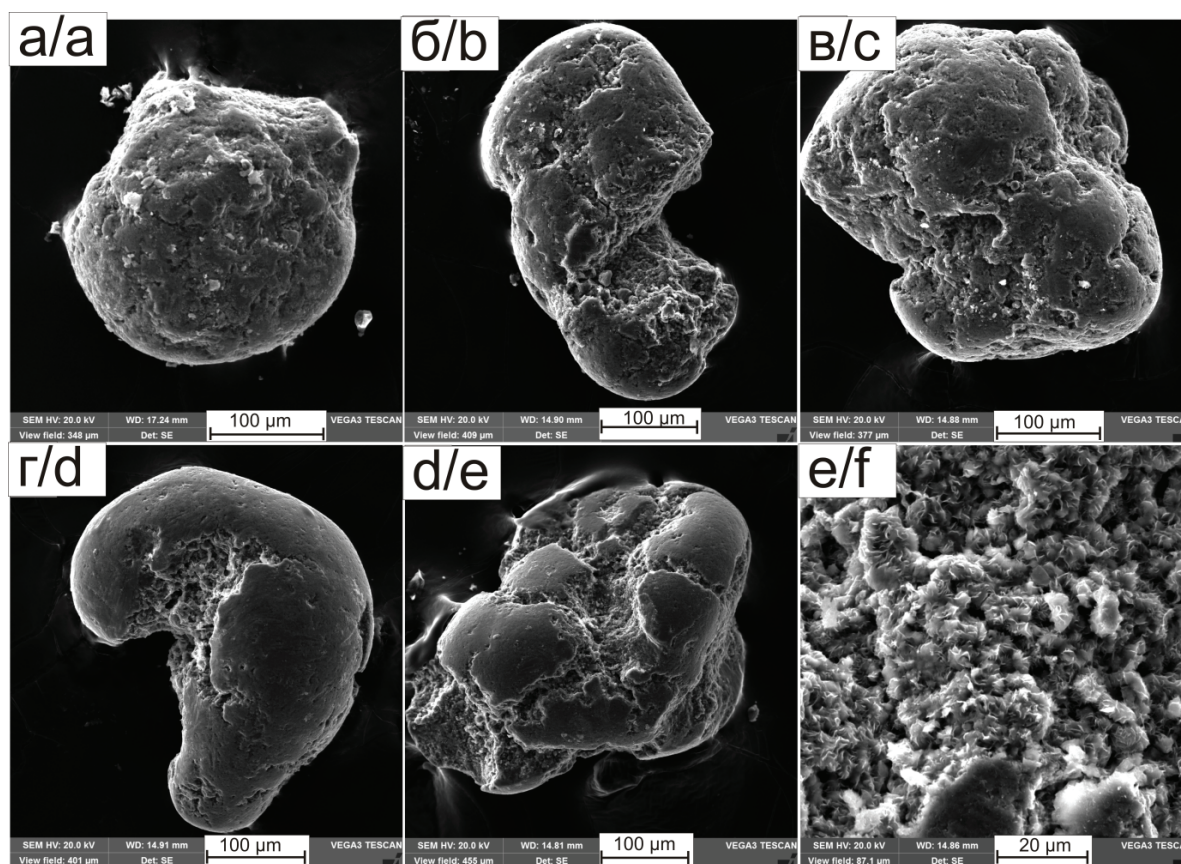
Fig. 2. Sedimentary log of the Bakchar deposit and photos of samples of glauconite rocks

ных шариков, и глаукониты выполнения, развивающиеся внутри пор, трещин преимущественно отмершей органики. Глауконитовые пеллеты имеют изометричные округлые (глобулярные, почковидные) (рис. 3, а) морфологические формы [25], глаукониты выполнения – вытянутые глобулярные (рис. 3, б), гроздевидные (рис. 3, в), биоморфные (рис. 3, г), сложные агрегаты (рис. 3, д). Поверхность зёрен шероховатая, ямчатая, со следами коррозии (трещины, пустоты), реже гладкая, блестящая. По окраске зёрен были выделены две основные разновидности: 1) фишашково-зеленые, зеленые; 2) зеленовато-желтые, зеленовато-коричневые. Помимо этого встречаются зёрна синевато-зеленого, почти черного цвета, а также желтые со слабым зеленоватым оттенком. Окраска зёрен, а также следы коррозии (выщелачивание калия), как известно [1], зависят от степени постседиментационных изменений глауконита. Коричневатое окаймление глауконита связано с более поздним осаждением гидроокислов железа в окислительной обстановке [2, 10, 26, 27]. Известно, что под действие метеорных вод на поздних стадиях формирования осадочных пород происходит селективное выщелачивание калия и железа вдоль неоднородностей (поры, микротрещины) глауконитовых глобулей, так называемый процесс «обратной» глауконитизации [28].

Химический состав глауконитов охарактеризован по данным рентгеноспектральных анализов (490 измерений). Кристаллохимическая формула, рассчитанная по кислородному методу, имеет усредненный вид:  $K_{0.51}(Fe_{1.83}Mg_{0.24}Ca_{0.05})_{2.12}[Si_{3.27}Al_{0.69}O_{10}](OH)_2nH_2O$ . Содержание основных оксидов в глауконитах варьирует в следующих пределах:  $K_2O$  – 2,5...7,7 %,  $Fe_2O_{3(total)}$  – 20,2...69,4 %,  $MgO$  – 1,7...2,8 %,  $CaO$  – 0,5...0,9 %,  $Al_2O_3$  – 5,5...11,5 %,  $SiO_2$  – 32,5...52,5 %,  $H_2O$  – 8,3...12,3 % (по разности).

Внутреннее строение глауконитовых глобулей представлено хаотично расположенными пластинками и чешуйками (рис. 3, е) с изрезанными очертаниями. Следует отметить что термины «глобуля», «зерно» и «гранула» в данной работе употребляются как синонимы. При высоких увеличениях в срезе некоторых глобулей вдоль пластинок наблюдаются следы окисления железа. На рис. 4 показано распределение калия, железа, кремния на участке среза зерна глауконита. В точке 1 содержание  $K_2O$  и  $FeO_{(total)}$  на порядок выше, чем в точке 2, что объясняется переходом  $Fe^{2+}$  в  $Fe^{3+}$  при параллельном вытеснении  $K^+$  из межслоевого пространства и замещении  $Si^{4+}$  минерала. Вероятно, это начальный этап преобразования глауконита в лептохлорит и гидрогетит. Многочисленные исследования зёрен глауконита с помощью электронной микроскопии показали, что степень их изме-





**Рис. 3.** Морфология и внутреннее строение зёрен глауконита из Бакчарского месторождения [25]: а) изометричная округлая форма; б) вытянутая глобулярная; в) гроздевидная; г) биоморфная; д) неправильная агрегатная; е) внутреннее строение зёрен

**Fig. 3.** Morphology and internal structure of glauconite grains in Bakchar ore deposit [25]: a) isometric round shape; b) elongated globular shape; c) clustered shape; d) biomorphic; e) composite aggregate shape; f) internal grain structure

нения не влияет на состав его минеральных включений, что свидетельствует о прочном сцеплении последних на пластинках глауконита.

На поверхности глауконитов и в его корродированных полостях отмечаются фрамбоидальные скопления пирита и агрегаты куларита. Фрамбоды имеют размер до 10 мкм и представляют собой скопления микросталлов кубической или октаэдрической формы размером до 1 мкм. Куларит встречается на поверхности глауконита в единичных случаях в виде скоплений микросферолитов размером до 5...6 мкм. Судя по форме и химическому составу, подобный куларит распространен в гидрогетитовых оолитах месторождения [24].

Во внутренней структуре изученных глауконитов сосредоточены разнообразные включения сульфидных, оксидных и силикатных минералов цветных (Cu, Zn, Pb, Sn, Bi, Co, Ni), редких и редкоземельных (Ce, Nd, La, Ta, Zr, Sr, Nb, Ba), благородных (Au, Ag), черных (Fe, Ti) металлов. Помимо перечисленных в них распространены типичные терригенные минералы данных отложений (кварц, полевые шпаты и др.), которые были описаны в предыдущих работах авторов. Следует отметить,

что в ходе проведенных исследований описаны минералы, которые ранее не были установлены в изучаемом разрезе. К ним относятся: золото, борнит, тетрадимит, карролит (?), сталдерит (?), барит, баритоцелестин, бисмит, бисмоклит, треворит (?), нормандит и некоторые другие минеральные фазы стронция, цинка, олова, которые не были определены в силу предельных технических возможностей сканирующей электронной микроскопии.

Наиболее распространенным минеральным включением в глауконите является фосфат редкоземельных элементов, который авторы [13] относят к аутигенной разновидности монацита (*куларит*). Размеры агрегатов куларита (рис. 5) варьируют от нескольких микрон до 15 мкм и представляют собой скопления микросферолитов размером 0,5...2,0 мкм. Усредненная формула куларита имеет следующий вид:  $Ca_{0,38}(Ce_{0,31}Nd_{0,11}La_{0,11}Y_{0,1})_{0,62}(P_{1,05}O_4)$ , при этом всегда устойчив тренд:  $Ce > Nd \geq La$ . Химический состав минерала характеризуется следующими вариациями: CaO – 7,3...13,8 %,  $Ce_2O_3$  – 21,9...27,6 %,  $Nd_2O_3$  – 7,5...9,5 %,  $La_2O_3$  – 5,8...8,9 %,  $Y_2O_3$  – 2,0...11,3 %,  $P_2O_5$  – 30,0...38,7 %, с примесями Pr, Dy, W, Os, U, Th до 2,5 %.

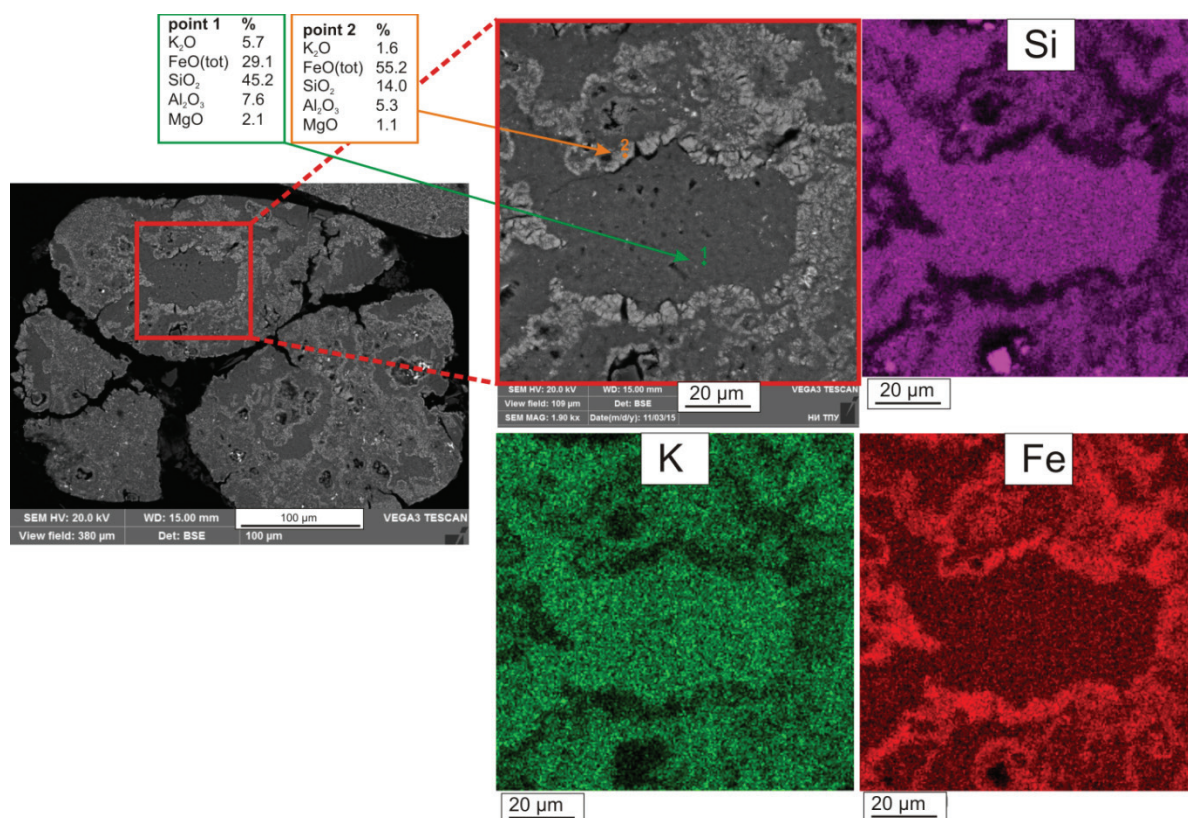


Рис. 4. Внутреннее строение и элементные карты распределения в срезе зерна глауконита  
 Fig. 4. Internal structure and element distribution maps in the section of glauconite grain

В глауконитовых породах по результатам атомно-абсорбционного анализа содержание золота варьирует в пределах 0,1...7,2 ррб при среднем 1,1 ррб, что ниже кларка в земной коре (1,8 ррб по [29]). При этом в мономинеральной фракции глауконита оно достигает 14,4 ррб. Повышенные содержания связаны с субмикронными включениями (рис. 6, а–в) в глауконите. Золото (рис. 6) имеет субизометричную, лапчатую форму с извилистыми очертаниями, размерами 0,4...0,7 мкм, в ред-

ких случаях до 2 мкм. По содержанию Ag (6,0...13,1 %) это золото приближается к электруму. Полученные данные доказывают наличие благородных металлов в среде осадкообразования. Вероятно, в условиях седиментации основная часть золота сорбировалась на поверхности аутигенных глауконитовых пластинок. В единичном случае обнаружено включение серебра (рис. 6, г) размером 0,5 мкм с содержанием серы 1,3 % и хлора 0,79 %.

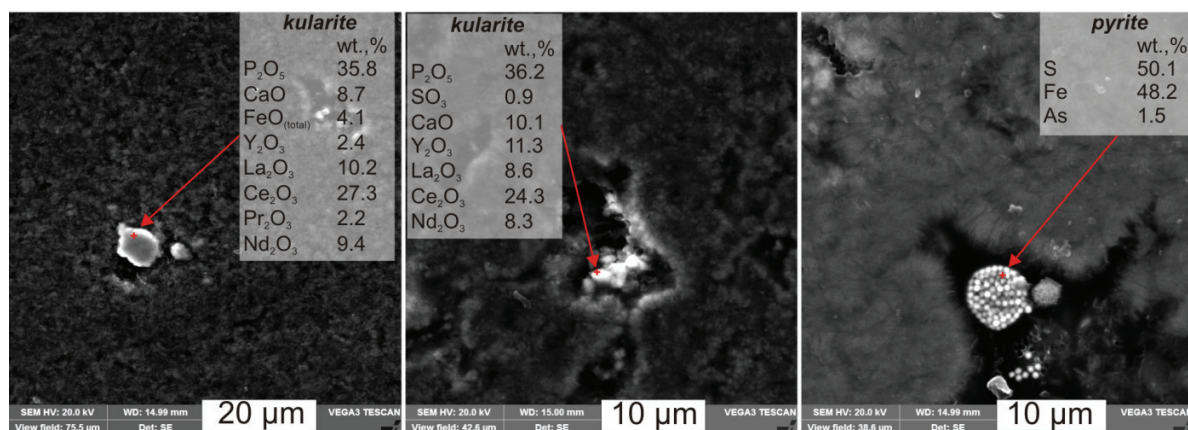


Рис. 5. Микровключения фосфата редкоземельных элементов (куларит) и фрамбоидов пирита в глауконитах  
 Fig. 5. Microinclusions of phosphate of rare earth elements (kularite) and framboids of pyrite in glauconite

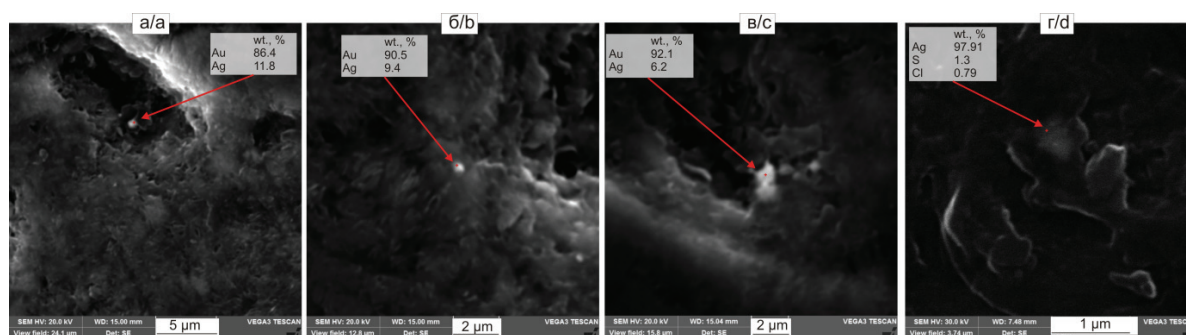


Рис. 6. Микровключения: а–в) золота; г) серебра в глауконитах

Fig. 6. Microinclusions of: а–с) gold; d) silver in glauconite

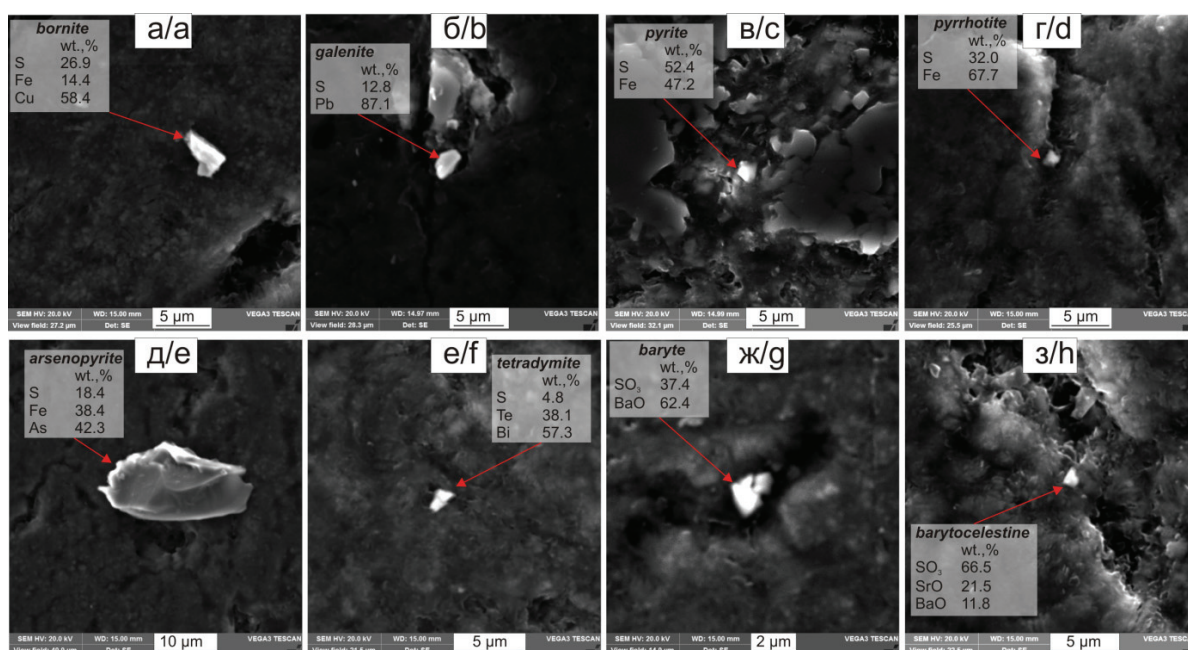
Среди сульфидных минералов в глауконитах встречается пирит, халькопирит, пирротин, борнит, арсенопирит, галенит, в единичных пробах отмечается карролит (?) и тетрадимит. Пирит является самым распространенным сульфидом. В большинстве проб он образует фрамбоидальные скопления (рис. 5), аналогичные тем, которые описаны на поверхности глауконитовых глобулей. В составе фрамбоидального пирита постоянно отмечается примесь мышьяка до 1,5 %. В более редких случаях он встречается в виде единичных кристаллов размером 1,2...2,5 мкм или в виде обломков более крупных кристаллов размером до 5,5 мкм, в которых не фиксируется мышьяк (рис. 6, в). В зависимости от генезиса можно выделить две генерации пирита в глауконитах. Аутигенный (или «in situ») пирит, образующий фрамбоиды с повышенным содержанием мышьяка, и терригенный (или кластогенный) пирит без мышьяка, который, вероятно, перетлагался в восстановительной обстановке в пределах шельфа.

Борнит распространен в виде зёрен (рис. 7, а) размером от 1,0 до 4,6 мкм, имеет формулу  $Cu_{4,8}Fe_{1,2}S_4$  с содержанием Fe – 11,5...16,5 %, Cu – 58,4...61,4 %; S – 25,2...27,1 %. Галенит образует кристаллы размером от 0,5...0,8 до 2,6 мкм (рис. 7, б) с содержанием свинца 85,8...87,2 %. Помимо пирита отмечается пирротин (рис. 7, г) размером до 2 мкм с содержанием железа 65...68 %. Халькопирит встречается в виде единичных зёрен изометричной формы размером 1,5...2,3 мкм с содержанием Fe – 35,9...37,4 %, Cu – 32,2...33,6 %, S – 30,3...31,8 %. Арсенопирит отмечается в виде зёрен размером 1,8...2,0 мкм. В единичной пробе он фиксируется в виде относительно крупного кристалла (рис. 7, д) размером 28 мкм. Морфология относительно крупного обломка арсенопирита свидетельствует о переносе и механической обработке зерна, то есть о его терригенной природе. Антимонит встречен в виде субизометричных зёрен размером 0,6...1,4 мкм с содержанием Sb – 71,6 % и S – 28,3 %. В пустотном пространстве глауконитового зерна найден сульфид кобальта и меди, формула которого имеет вид  $Co_{3,24}Cu_{0,72}S_4$ , с примесью

Sn (1 %). Сульфид имеет размер 1,5...1,8 мкм и, судя по составу, является карролитом (?) с более высоким содержанием кобальта. Тетрадимит встречен в единичной пробе в виде ромбоэдрического кристалла (рис. 7, е) размером 1,9 мкм с содержанием Bi – 56,8 %, Te – 38,3 %, S – 4,8 %. В двух пробах отмечается сульфид меди, цинка, мышьяка и олова, который по рассчитанной формуле  $(Cu_{3,6}Zn_{0,9}(As_{3,3}Sb_{0,4})S_6)$  похож на сталдерит (?). Этот сульфид представлен кристаллами вытянутой формы размером 3,4 и 0,8 мкм.

В глауконитах изучаемых отложений широко распространен барит и, в редких случаях, отмечается баритоцелестин. Барит образует зерна преимущественно субизометричной формы (рис. 7, ж) размером от 0,6 до 2,5 мкм с содержанием  $SO_3$  – 36...38,3 %, и BaO – 61,4...63,6 %, в некоторых случаях отмечается содержание Pm до 2 %. Баритоцелестин наблюдается в виде включения изометричной формы (рис. 7, з) размером 2 мкм. От барита отличается высоким содержанием стронция (SrO – 21,5 %).

Ассоциация сульфидов и наличие сульфатов указывает на высокую насыщенность глауконитов сероводородом и тяжелыми цветными металлами. Благодаря разложению органического вещества, внутри глауконитовых гранул создавалась восстановительная среда, полузакрытая от доступа кислорода. Эта среда способствовала формированию новых минеральных фаз сульфидов, сульфатов и золота, параллельно с развитием глауконита. О связи глауконита и пирита в среде осадкообразования уже неоднократно упоминалось в литературе [30–32]. При первоначальном аэробном (или аэробно-анаэробном) разложении органического вещества внутри гранул глауконита происходила редукция сульфат-ионов [33], которые вступали в реакцию с катионами бария. В результате образовывался барит и баритоцелестин. По мере погружения осадка доступ кислорода становился ограниченным или прекращался и в полузакрытых системах глауконитовых гранул протекали анаэробные процессы [30–34], в результате чего формировались сульфиды.



**Рис. 7.** Минеральные микровключения в глауконитах: а) борнит; б) галенит; в) пирит; г) пирротин; д) арсенопирит; е) тетрадимит; ж) барит; з) баритоцелестин

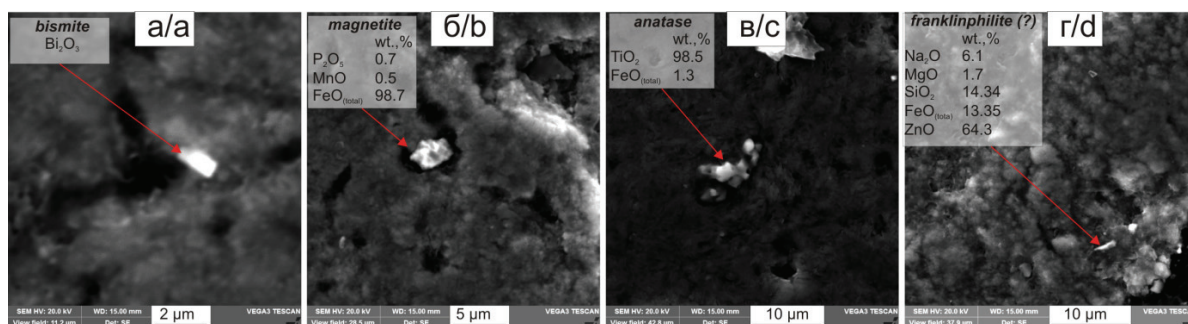
**Fig. 7.** Mineral microinclusions in glauconite: a) bornite; b) galenite; c) pyrite; d) pyrrhotite; e) arsenopyrite; f) tetradymite; g) barite; h) barytocelestine

Эти данные позволяют рассматривать обстановку образования глауконита как своеобразный сорбционно-сероводородный (восстановительный) геохимический барьер в илстом слое прибрежно-морской зоны верхнемелового «Западно-Сибирского» моря.

Помимо типичных акцессорных оксидов (магнетит (рис. 8, б), ильменит, анатаз (рис. 8, в)) изучаемых толщ, в глауконитах обнаружены сложные оксиды висмута, стронция, никеля (бисмит, группа перовскита, треворит). Они встречаются в нескольких пробах в виде кристаллов вытянутой формы с неровными очертаниями. *Бисмит* (рис. 8, а) имеет размеры от 1,3...1,8 до 5,5...8,8 мкм и содержит примесь Cu до 5 %. В одной пробе как результат окисления он полностью покрывается *бисмокли-*

*том* (BiClO). Найденный оксид стронция имеет формулу  $Sr_{0.84}Ca_{0.14}Fe_{0.03}O_3$ , что позволяет отнести его к *группе перовскита*. Этот минерал встречается в виде ксеноморфного кристалла размером 8,5 мкм. Сложный оксид никеля и железа встречается в одной пробе в форме двух кристаллов размером по 2 мкм вытянутой формы. По кристаллохимический формуле ( $Ni_{3.14}Fe_{0.51}Cu_{0.23}O_4$ ) этот оксид больше всего похож на *треворит* (?).

К числу «редких» силикатов, локализующихся в глауконитах, относятся: циркон, нормандит, франклинфилит (?). *Циркон* отмечается в пробах, отобранных с глубин от 180 метров. Этот минерал описан в предыдущих работах авторов в составе оолитовых железных руд [24]. В глауконитах он встречается в виде обломков кристаллов размером до 1 мкм.



**Рис. 8.** Минеральные микровключения оксидов и силикатов в глауконитах (изображения во вторичных электронах): а) бисмит; б) магнетит; в) анатаз; г) франклинфилит (?)

**Fig. 8.** Mineral microinclusions of oxides and silicates in glauconite: a) bismite; b) magnetite; c) anatase; d) franklinphillite (?)

В одной пробе были найдены микронные (1,2 мкм) включения минерала со следующим составом:  $Nb_2O_5$  – 29,5 %,  $FeO_{(total)}$  – 22,7 %,  $SiO_2$  – 26,9 %,  $Al_2O_3$  – 6,6 %,  $Na_2O$  – 4,4 %,  $MgO$  – 1,6 %,  $K_2O$  – 3,0 %,  $CaO$  – 5,9 %,  $TiO_2$  – 0,5 %. Его кристаллохимическая формула  $Na_{0,48}Ca_{0,36}K_{0,21}Fe_{1,08}Nb_{0,75}[Si_{1,51}Al_{0,44}O_7](O_{0,53}F_{0,47})$  соответствует *нормандиту*, минералу группы вёрлита. Минерал с рассчитанной формулой  $Na_{0,99}Fe_{0,93}Mg_{0,21}Zn_{3,97}Si_{1,24}O_4$  является предположительно *франклинфилитом* (?) и имеет размер до 3 мкм (рис. 8, з).

Оксидные и силикатные минералы имеют более крупные размеры относительно сульфидных и, преимущественно, ксеноморфную форму, что указывает на их терригенную природу. Большинство этих минералов известны в породах (в том числе в коре выветривания) складчатого обрамления Западно-Сибирской низменности (Салаирский кряж, Кузнецкий Алатау, Западные Саяны, Енисейский кряж), которые, вероятно, являлись их источниками.

#### Выводы

В верхнемеловой период прибрежно-морская обстановка древнего моря в пределах Бакcharского месторождения способствовала интенсивному формированию глауконитовых пород. В илистом слое за счет преобладания песчано-алевритового материала и высокого содержания фекальных частиц и органики создавалась восстановительная, слабопроницаемая (за счет пористости осадка) среда. В этой среде происходила мобилизация железа из окружающего осадка и формирование глауконитовых гранул, преимущественно на фекальных шариках и другом биоматериале.

В результате выполненных исследований в глауконитах Бакcharского месторождения устано-

влено наличие минеральных вкраплений золота, некоторых минералов цветных и редких металлов, многие из которых в данном районе обнаружены впервые. К их числу относятся: самородное золото, барит, борнит, карролит, тетрадимит, бисмит, треворит, нормандит, баритоцелестин, а также не определенные, в силу предельной разрешающей способности прибора, минеральные фазы стронция, цинка, олова. Размер включений варьирует от 0,1 до 10 мкм. Золото локализуется в глауконитовых гранулах в нижней и средней частях пластов в виде зёрен размером от 0,4 до 2,0 мкм с содержанием серебра до 13 %.

Широкий спектр микровключений объясняется высокой сорбционной способностью материнского минерала и благоприятными физико-химическими условиями среды. Это позволяет считать обстановку формирования глауконита своеобразным геохимическим барьером, на котором происходит образование новых минеральных фаз микронных размеров.

Состав разнородных включений в глауконитах свидетельствует о том, что минеральный субстрат, поступающий в морской бассейн, был обогащен благородными, цветными и редкими металлами. Вероятно, источниками металлов послужили размываемые породы восточного складчатого обрамления Западной Сибири.

Полученные данные позволяют судить о глауконите Бакcharского месторождения как о минерале, отражающем состав среды осадкообразования, и о потенциальном нетрадиционном источнике золота в будущем.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта 16-45-700090.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Odin G.S., Matter A. De glauconiarium origine // *Sedimentology*. – 1981. – V. 28. – P. 611–641.
2. Николаева И.В. Минералы группы глауконита в осадочных формациях. – Новосибирск: Наука, 1977. – 321 с.
3. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Генетические типы диоктаэдрических слюд. Сообщение 1. Семейство железисто-магнезиальных слюд (глаукониты, селадониты) // *Литология и полезные ископаемые*. – 1986. – № 5. – С. 563–580.
4. Substrate control on formation and maturation of glauconites in the Middle Eocene Harudi Formation, western Kutch / S. Banerjee, S.L. Chatteraj, P.K. Saraswati, S. Dasgupta, U. Sarkar // *India Marine and Petroleum Geology*. – 2012. – V. 30. – P. 144–160.
5. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: implications for evaluation of stratigraphic condensation / S. Banerjee, U. Bansal, K. Pande, S.S. Meena // *Sedimentary Geology*. – 2016. – V. 331. – P. 12–29.
6. Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition // *Journal of Palaeogeography*. – 2016. – V. 5 (1). – P. 43–71.
7. Meunier A., El Albani A. The glauconite-Fe-illite-Fe-smectite problem: a critical review // *Terra Nova*. – 2007. – V. 19. – P. 95–104.
8. Wigley R., Compton J.S. Oligocene to Holocene glauconite-phosphorite grains from the Head of the Cape Canyon on the western margin of South Africa // *Deep-Sea Research II*. – 2007. – V. 54. – P. 1375–1395.
9. Kossovskaya A.G., Drits V.A. The variability of micaceous minerals in sedimentary rocks // *Sedimentology*. – 1970. – V. 15. – P. 83–101.
10. Николаева И.В. Фациальная зональность химического состава минералов группы глауконита и определяющие ее факторы // *Минералогия и геохимия глауконита*. – Новосибирск: Наука. – 1981. – С. 4–41.
11. Милецкий Б.Е. Глауконитовые пески – предполагаемая металлогенная формация // *Руды и металлы*. – 2012. – Т. 3. – С. 69–71.
12. Пшеничкин А.Я., Домаренко В.А. Петрографо-геохимические особенности Бакcharского месторождения // *Вестник науки Сибири*. – 2011. – № 1(1). – С. 13–18. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/17/82> (дата обращения: 25.11.2011).
13. 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. – V. 21 (1). – Art. numb. 012003.
14. Cline J.S., Hofstra A.H., Manteau J.L. Carlin-Type Gold Deposits in Nevada: Critical Geologic Characteristics and Viable Models // *Econom. Geol.*, 100<sup>th</sup> Anniversary Volume. – 2005. – P. 451–484.
  15. The assembly of gold nanoparticle monolayer onto mica substrate / W. Guo, L. Wei, X.T. Zhang, Y.B. Bai // *Chem. J. Chinese Univ.* – 2001. – V. 22. – P. 1987–1989.
  16. Nanoparticles of noble metals in the supergene zone / S.M. Zhmodik, Yu.A. Kalinin, N.A. Roslyakov, A.G. Mironov, Yu.L. Mikhlin, D.K. Belyanin, N.A. Nemirovskaya, A.M. Spiridonov, G.V. Nesterenko, E.V. Airiyants, T.N. Moroz, T.A. Bul'bak // *Geology of Ore Deposits*. – 2012. – V. 54. – Iss. 2. – P. 141–154.
  17. Никитин Н.М., Ясырев А.П. О среднем содержании золота в осадочных породах // *Геохимия*. – 1974. – № 8. – С. 1237–1239.
  18. Nesterenko G., Kolpakov V., Boboshko L.P. Native gold in complex Ti–Zr placers of the southern West Siberian Plain // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – V. 54. – Iss. 12. – P. 1484–1498.
  19. Decomposition and Preconcentration Methods for the Determination of Pt, Pd, Re in Mineral Raw Materials. *Advanced Materials Research / Y. Oskina, E. Pakrieva, E. Ustinova, A. Kryazhov // Scientific Journal*. – 2014. – V. 1040. – P. 278–281.
  20. Glauconite and phosphate peloids in Mesozoic carbonate sediments (Eastern Subbetic Zone, Betic Cordilleras, SE Spain) / J. Jiménez-Millán, J.M. Molina, F. Nieto, L. Nieto, P.A.R. Ortiz // *Clay Minerals*. – 1998. – V. 33. – P. 547–559.
  21. Delamette M. Trace fossil assemblages from the Albian phosphate-rich sandstones of the Helvetic Shelf (Western Alps) // *Cretaceous Research*. – 1989. – V. 10. – P. 207–219.
  22. Garzanti E., Haas R., Jadoul F. Ironstones in the Mesozoic passive margin sequence of the Tethys Himalaya (Zaskar, Northern India): sedimentology and metamorphism / Eds. T.P. Young, W.E.G. Taylor // *Phanerozoic Ironstones*. – London: Geological Society Special Publication. – 1989. – V. 46. – P. 229–244.
  23. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: distribution patterns and sequence-stratigraphic significance // *International Association of Sedimentologists Special Publications*. – 2012. – V. 45. – P. 37–54.
  24. Rudmin M., Mazurov A., Ruban A. Facies and Sedimentation Model of Iron-ore Sequence in Bakchar Deposit // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress*. – 2015. – V. 24. – Art. numb. 012028.
  25. Structural-chemical features and morphology of glauconites in sedimentary iron ore of Bakchar prospect (Western Siberia) / M. Rudmin, I. Reva, A. Gunko, A. Mazurov, R. Abramova // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2015. – V. 27. – Art. numb. 012026.
  26. Depositional controls on glaucony texture and composition, Upper Jurassic, West Siberian Basin / V.G. Eder, A. Martín-Algarra, A. Sánchez-Navas, Y.N. Zanin, A.G. Zamirailova, Y.N. Lebedev // *Sedimentology*. – 2007. – V. 54. – P. 1365–1387.
  27. Color, mineralogy and composition of Upper Jurassic West Siberian glauconite: useful indicators of paleoenvironment / A. Sánchez-Navas, A.M. Algarrá, V. Eder, B.J. Reddy, F. Nieto, Y.N. Zanin // *The Canadian Mineralogist*. – 2008. – V. 46. – P. 1545–1564.
  28. Courbe C., Velde B., Meunier A. Weathering of glauconites: reversal of the glauconitization process in a soil profile in western France // *Clay Minerals*. – 1981. – V. 16. – P. 231–243.
  29. Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. – UK: Blackwell, 1985. – 384 p.
  30. Kelly J.C., Webb J.A. The genesis of glaucony in the Oligo-Miocene Torquay Group, southeastern Australia: petrographic and geochemical evidence // *Sedimentary Geology*. – 1999. – V. 125. – P. 99–114.
  31. Lee C.H., Choi S., Suh M. High iron glaucony from the continental shelf of the Yellow Sea off the southwestern Korean Peninsula // *Journal of Asian Earth Science*. – 2002. – V. 20. – P. 507–515.
  32. El Albani A., Meunier A., Fürsich F. Unusual occurrence of glauconite in a shallow lagoonal environment (Lower Cretaceous, northern Aquitaine Basin, SW France) // *Terra Nova*. – 2005. – V. 17. – P. 537–544.
  33. Страхов Н.М. Железородные фации и их аналоги в истории Земли. – М.: Изд-во АН СССР. – 1947. – 266 с.
  34. Biological processes and apatite formation in sedimentary environments / K.P. Krajewski, P. Cappelen, J. Trichet, O. Kuhn, J. Lucas, A. Martín-Algarra, L. Prevot, V.C. Tewari, L. Gaspar, R.I. Knight, M. Lamboy // *Eclogae Geologicae Helvetiae*. – 1994. – V. 87 (3). – P. 701–745.

Поступила 20.04.2016 г.

#### Информация об авторах

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, ассистент 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.

**Рева И.В.**, студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.21:549.02:553.679

## MINERAL MICROINCLUSIONS IN GLAUCONITE OF BAKCHAR DEPOSIT (TOMSK REGION)

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

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

Igor V. Reva<sup>1</sup>,  
igor\_1993@mail.ru

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

Due to its unique properties glauconite is a prospective geological information source. Glauconite is an active natural sorbent. It can accumulate elements in the environment of sedimentation, which subsequently form a new mineral phase within the granules of glauconite.

The relevance of the study is determined by the possibility of awareness of sedimentation on the basis and through the study of the matter created by them within the Bakchar deposit.

The main aim of the research is to study the mineral microinclusions in glauconite of Bakchar deposit to describe the mineral substrate coming into sedimentation basin.

The methods used in the study: samples sieving into granulometric classes with the size more than 1mm, 1...0,5, 0,5...0,2, 0,2...0,1, less than 0,1 mm; electromagnetic separation (EVS 10/5) at 4...2 A; additional cleaning of glauconite grains from magnetic fraction under a binocular microscope; pressed pellet production; scanning electron microscope (TESCAN VEGA 3 SBU) with energy dispersive attachment OXFORD X-Max50 for X-ray spectroscopic analysis.

With the help of electron microscopy, microinclusions of gold, silver and other minerals (phosphates, sulfides, sulfates, oxides, and silicates) were found in the glauconites of Bakchar deposit. Mineral associations of microinclusions indicate the occurrence of precious, non-ferrous and rare metals in the sedimentation environment. It is assumed that glauconite as an active natural sorbent «was loaded» by metals and ultrafine terrigenous components on the background of hydrogen sulfide contamination of sediment with microorganisms. These conditions were favorable for forming new mineral phases of sulfides, sulfates and gold. The findings are a sign of potential gold mineralization of glauconite rocks of Bakchar deposit.

### Key words:

Glauconite, gold, microinclusions, sulphides, Bakchar deposit.

The research was financially supported by the RFBR and the authorities of Tomsk region within the scientific project 16–45–700090.

### REFERENCES

1. Odin G.S., Matter A. De glauconiarium origine. *Sedimentology*, 1981, vol. 28, pp. 611–641.
2. Nikolaeva I. *Mineraly gruppy glaukonita v osadochnykh formatsiyakh* [Minerals of Glauconite Group in Sedimentary Formations]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 319 p.
3. Drits V.A., Kossovskaya A.G. Geneticheskie tipy dioktaedricheskikh slyud. Soobshchenie 1. Semeystvo zhelezisto-magnezialnykh slyud (glaukonity, seladonity) [Genetic types of dioctahedral mica. Issue 1. The family of iron-magnesia mica (glauconite seladonite)]. *Lithology and mineral resources*, 1986, no. 5, pp. 563–580.
4. Banerjee S., Chattoraj S.L., Saraswati P.K., Dasgupta S., Sarkar U. Substrate control on formation and maturation of glauconites in the Middle Eocene Harudi Formation, western Kutch. *India Marine and Petroleum Geology*, 2012, vol. 30, pp. 144–160.
5. Banerjee S., Bansal U., Pande K., Meena S.S. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: implications for evaluation of stratigraphic condensation. *Sedimentary Geology*, 2016, vol. 31, pp. 12–29.
6. Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition. *Journal of Palaeogeography*, 2016, vol. 5 (1), pp. 43–71.
7. Meunier A., El Albani A. The glauconite-Fe-illite-Fe-smectite problem: a critical review. *Terra Nova*, 2007, vol. 19, pp. 95–104.
8. Wigley R., Compton J.S. Oligocene to Holocene glauconite-phosphorite grains from the Head of the Cape Canyon on the western margin of South Africa. *Deep-Sea Research II*, 2007, vol. 54, pp. 1375–1395.
9. Kossovskaya A.G., Drits V.A. The variability of micaceous minerals in sedimentary rocks. *Sedimentology*, 1970, vol. 15, pp. 83–101.
10. Nikolaeva I.V. Fatsialnaya zonalnost khimicheskogo sostava mineralov gruppy glaukonita i opredelyayushchie ee factory [Facies zonation of the chemical composition of glauconite group minerals and its determinants]. *Mineralogiya i geokhimiya glaukonita* [Mineralogy and geochemistry of glauconite]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. pp. 4–41.
11. Miletsky B.E. Glauconite sand is possible ore-metal formation. *Ores and metals*, 2012, vol. 3, pp. 69–71. In Rus.
12. Pshenichkin A.Ya., Domarenko V.A. Petrography and geochemical features of the Bakchar deposit. *Siberian Journal of Science*, 2011, no. 1 (1), pp. 13–18. In Rus. Available at: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/17/82> (accessed 25 November 2011).
13. 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 (1), art. numb. 012003.

14. Cline J.S., Hofstra A.H., Manteau J.L. Carlin-Type Gold Deposits in Nevada: Critical Geologic Characteristics and Viable Models. *Econom. Geol., 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*, 2005, pp. 451–484.
15. Guo W., Wei L., Zhang X.T., Bai Y.B. The assembly of gold nanoparticle monolayer onto mica substrate. *Chem. J. Chinese Univ.*, 2001, vol. 22, pp. 1987–1989.
16. Zhmodik S.M., Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Mironov A.G., Mikhlin Yu.L., Belyanin D.K., Nemirovskaya N.A., Spiridonov A.M., Nesterenko G.V., Airiyants E.V., Moroz T.N., Bul'bak T.A. Nanoparticles of noble metals in the supergene zone. *Geology of Ore Deposits*, 2012, vol. 54, Iss. 2, pp. 141–154.
17. Nikitin N.M., Yasyrev A.P. O srednem sodержanii zolota v osadochnykh porodakh [On average gold content in sedimentary rocks]. *Geochemistry*, 1974, no. 8, pp. 1237–1239.
18. Nesterenko G., Kolpakov V., Boboshko L.P. Native gold in complex Ti–Zr placers of the southern West Siberian Plain. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, Iss. 12, pp. 1484–1498.
19. Oskina Y., Pakrieva E., Ustinova E., Kryazhov A. Decomposition and Preconcentration Methods for the Determination of Pt, Pd, Re in Mineral Raw Materials. *Advanced Materials Research. Scientific Journal*, 2014, vol. 1040, pp. 278–281.
20. Jiménez-Millán J., Molina J.M., Nieto F., Nieto L., Ortiz P.A.R. Glauconite and phosphate peloids in Mesozoic carbonate sediments (Eastern Subbetic Zone, Betic Cordilleras, SE Spain). *Clay Minerals*, 1998, vol. 33, pp. 547–559.
21. Delamette M. Trace fossil assemblages from the Albian phosphate-rich sandstones of the Helvetic Shelf (Western Alps). *Cretaceous Research*, 1989, vol. 10, pp. 207–219.
22. Garzanti E., Haas R., Jadoul F. Ironstones in the Mesozoic passive margin sequence of the Tethys Himalaya (Zaskar, Northern India): sedimentology and metamorphism. T.P. Young, W.E.G. Taylor (Eds.), *Phanerozoic Ironstones. Geological Society Special Publication*, 1989, vol. 46, pp. 229–244.
23. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: distribution patterns and sequence-stratigraphic significance. *International Association of Sedimentologists Special Publications*, 2012, vol. 45, pp. 37–54.
24. Rudmin M., Mazurov A., Ruban A. Facies and Sedimentation Model of Iron-ore Sequence in Bakchar Deposit. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress*, 2015, vol. 24, art. numb. 012028.
25. Rudmin M., Reva I., Gunko A., Mazurov A., Abramova R. Structural-chemical features and morphology of glauconites in sedimentary iron ore of Bakchar prospect (Western Siberia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2015, vol. 27, art. numb. 012026.
26. Eder V.G., Martín-Algarra A., Sánchez-Navas A., Zanin Y.N., Zamirailova A.G., Lebedev Y.N. Depositional controls on glaucony texture and composition, Upper Jurassic, West Siberian Basin. *Sedimentology*, 2007, vol. 54, pp. 1365–1387.
27. Sánchez-Navas A., Algarra A.M., Eder V., Reddy B.J., Nieto F., Zanin Y.N. Color, mineralogy and composition of Upper Jurassic West Siberian glauconite: useful indicators of paleoenvironment. *The Canadian Mineralogist*, 2008, vol. 46, pp. 1545–1564.
28. Courbe C., Velde B., Meunier A. Weathering of glauconites: reversal of the glauconitization process in a soil profile in western France. *Clay Minerals*, 1981, vol. 16, pp. 231–243.
29. Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. UK, Blackwell, 1985. 384 p.
30. Kelly J.C., Webb J.A. The genesis of glaucony in the Oligo-Miocene Torquay Group, southeastern Australia: petrographic and geochemical evidence. *Sedimentary Geology*, 1999, vol. 125, pp. 99–114.
31. Lee C.H., Choi S., Suh M. High iron glaucony from the continental shelf of the Yellow Sea off the southwestern Korean Peninsula. *Journal of Asian Earth Science*, 2002, vol. 20, pp. 507–515.
32. El Albani A., Meunier A., Fürsich F. Unusual occurrence of glauconite in a shallow lagoonal environment (Lower Cretaceous, northern Aquitaine Basin, SW France). *Terra Nova*, 2005, vol. 17, pp. 537–544.
33. Strakhov N.M., Zhelezorudnye fatsii i ikh analogi v istorii Zemli [Iron Ore Facies and their Analogues in the Earth's History]. *Tr. IGAN SSSR. Geol. Ser.*, 1947, vol. 22, pp. 231–243.
34. Krajewski K.P., Cappelen P., Trichet J., Kuhn O., Lucas J., Martín-Algarra A., Prevot L., Tewari V.C., Gaspar L., Knight R.I., Lamboy M. Biological processes and apatite formation in sedimentary environments. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 1994, vol. 87 (3), pp. 701–745.

Received: 20 April 2016.

#### Information about the authors

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., teaching assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksey K. Mazurov**, Dr. Sc., first vice-rector, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Igor V. Reva**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.



УДК 556.06; 556.166; 556; 512

## КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ БОКОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС

**Бураков Дмитрий Анатольевич<sup>1</sup>,**  
daburakov@yandex.ru

**Путинцев Лев Александрович<sup>2</sup>,**  
leo77789@mail.ru

<sup>1</sup> Институт землеустройства, кадастров и природообустройства Красноярского государственного аграрного университета, Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 90.

<sup>2</sup> ФГБУ «Среднесибирское УГМС», Россия, 660049, г. Красноярск, ул. Сурикова, 28.

**Актуальность работы.** Богучанская гидроэлектростанция на р. Ангаре, введенная в эксплуатацию в 2014 г., является одним из наиболее крупных объектов гидротехнического строительства в Восточной Сибири. Она предназначена для покрытия дефицита растущего энергопотребления в связи с развитием в регионе Нижнего Приангарья энергоёмких производств. При проектном режиме работы ГЭС уровень водохранилища должен изменяться в пределах  $\pm 0,5$  м. При таком незначительном изменении уровня для предотвращения ситуаций, связанных с переполнением Богучанского водохранилища, требуются надежные краткосрочные прогнозы бокового притока воды. Между тем, методика расчета и прогноза бокового притока воды, разработанная в Среднесибирском УГМС в 80-х гг., устарела как в научно-методическом отношении, так и вследствие закрытия за последние 20 лет большинства пунктов гидрометеорологических наблюдений на нижней Ангаре. Все это определяет актуальность выполненной работы.

**Цель работы:** реализация математической модели формирования речного стока в ландшафтно-гидрологических условиях бассейна водохранилища Богучанской ГЭС для краткосрочных (1–7 суток) прогнозов бокового притока.

**Методы исследования:** метод водного баланса, географо-гидрологический метод, математическое моделирование процессов формирования стока.

**Результаты.** Проведена адаптация математической модели формирования водного стока на основе интеграла свертки для целей краткосрочного прогноза притока воды в Богучанское водохранилище. Рассмотрена ландшафтно-гидрологическая основа, обеспечивающая реализацию модели. Выполнена оценка запасов воды в снежном покрове на территории бассейна бокового притока, использующая наземные снегомерные съемки Росгидромета и спутниковую информацию о динамике заснеженности. Обоснован комплексный показатель водопроницаемости почв бассейна, учитывающий осеннее увлажнение и промерзание почвогрунтов. Разработана технология краткосрочного прогноза суточного бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС.

### Ключевые слова:

Весеннее половодье, концептуальная модель формирования стока, гидрологические прогнозы, Богучанская ГЭС, боковой приток.

### Объект исследования

Створ плотины Богучанского гидроузла расположен в 444 км от устья р. Ангары и на 375 км ниже Усть-Илимской ГЭС. Диапазон высот в бассейне бокового притока водохранилища от 208 до 650 м, преобладают высоты 208–400 м. Возвышенная часть бассейна располагается на востоке, между реками Ангарой и Подкаменной Тунгуской. В бассейне Богучанского водохранилища самыми значительными реками являются Кова, Тушама, Ката и Едарма.

Рассматриваемая территория характеризуется холодными зимами с преобладающей малооблачной и безветренной погодой. Лето в среднем теплое, короткое. Годовое количество осадков в пределах бассейна водохранилища уменьшается с северо-востока на юго-запад от 500 до 350 мм. Наименьшие значения сумм осадков в бассейне наблюдаются в межгорной долине Ангары. Средняя за многолетний период высота снежного покрова на левобережье Ангары не превышает 50 см, в пределах правобережья она достигает 75–80 см.

Исследуемая территория находится в зоне южной и средней тайги с преобладанием светлохвойного леса с наибольшим распространением сосны. Только в северо-западной части бассейна встречается темнохвойная тайга. Озер и болот в бассейне водохранилища встречается мало. Механический состав почв разнообразен. Северо-западная и центральная части бассейна представлены хрящеватыми почвами. В юго-западной части бассейна встречаются легкосуглинистые и супесчаные почвы, а в восточной части – среднесуглинистые.

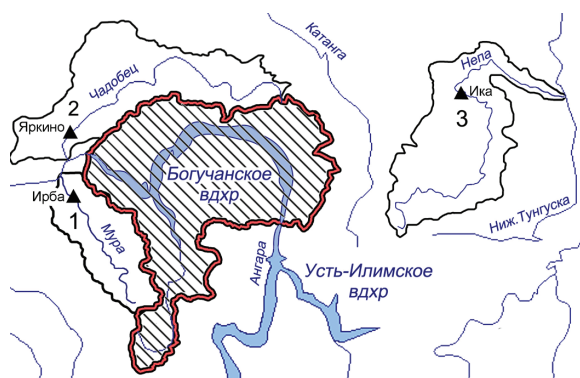
### Постановка задачи

Суммарный приток к створу Богучанской ГЭС складывается из двух составляющих:

- 1) приток с зарегулированной части бассейна (сбросы Усть-Илимской ГЭС);
- 2) боковой приток с промежуточной площади бассейна (рис. 1), между плотинами Уст-Илимской и Богучанской ГЭС (незарегулированный боковой приток).

Существуют два основных метода определения бокового притока воды в водохранилище: по сумме расходов впадающих рек (гидрометрический метод) и по уравнению водного баланса водохранилища [1–3]. Определение притока воды по уравнению водного баланса является менее предпочтительным, поскольку в вычисленную величину притока в неявном виде входят ошибки оценки всех элементов водного баланса, а также погрешности учета аккумуляции воды в водохранилище из-за деnivelляции водной поверхности. При небольшой длительности расчетного интервала (сутки) рекомендуется рассчитывать приток с помощью гидрометрического метода.

По расходам воды рек-аналогов, бассейны которых располагаются в пределах промежуточной площади водосбора, выполнен ретроспективный расчет ежедневного бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС за 1977–1987 гг. Однако в настоящее время наблюдения на реках-аналогах прекращены.



**Рис. 1.** Схема бассейна бокового притока Богучанского водохранилища (косая штриховка) и расположение рек-аналогов, используемых в современной модели для расчета бокового притока: 1 – р. Чадобец; 2 – р. Мура; 3 – р. Непа

**Fig. 1.** Scheme of the basin of Boguchanskoe reservoir lateral inflow (slash hatching) and location of rivers-analogues, used in the modern model for calculating lateral inflow: 1 – Chadobets; 2 – Mura; 3 – Neпа

Современная методика расчета бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС обоснована в [4]. В ней используются данные наблюдений трех малых бассейнов, которые располагаются на небольшом удалении от бассейна бокового притока в Богучанское водохранилище (рис. 1) и характеризуются подобными ландшафтно-гидрологическими условиями. Это бассейны рек Чадобец – п. Яркино, Мура – п. Ирка и Непа – п. Ика. Важно, что наблюдения на этих реках производились и в предшествующие годы (1977–1987), что позволило в [4] обосновать возможность их использования для расчета бокового притока.

Рассмотренная ниже методика прогноза бокового притока в Богучанское водохранилище основана на концептуальной модели формирования

стока с сосредоточенными параметрами. На практике пока нет оснований для перехода от выпуска краткосрочных гидрологических прогнозов по концептуальным моделям к прогнозам по физико-математическим моделям с распределенными параметрами, которые в настоящее время, как правило, не обеспечены необходимой гидрометеорологической информацией [5–9]. В основе рассматриваемой ниже модели положены следующие принципы [10]:

- в бассейне бокового притока водохранилища Богучанской ГЭС, квазиоднородном по ландшафтно-гидрологическим особенностям, были выделены четыре высотные зоны с шагом по высоте 100 м;
- в высотных зонах пространственная неравномерность снегонакопления и емкостного поглощения учитывается с применением вероятностных распределений;
- русловое добегание воды рассчитывается с применением функции плотности вероятностного распределения времени добегания элементарных объемов воды и теоретических формул моментов распределения.

Модель позволяет выпускать прогноз с заблаговременностью до 4–7 суток. Для задания температуры и осадков за период заблаговременности используются данные оперативных метеорологических прогнозов систем метеорологического прогнозирования: COSMO-RU (Росгидромет), NCEP (Национальная служба погоды США), UKMO (Метеорологическая служба Великобритании).

#### Гидролого-математическая модель прогноза

Используемая концептуальная модель основана на параметрическом описании основных процессов формирования стока [10]. Структура модели в однородном ландшафтно-гидрологическом районе включает следующие блоки:

- расчет снегонакопления по районам бассейна;
- расчет снеготаяния и площади снегового покрытия;
- расчет водоотдачи бассейна от талых вод и жидких осадков с учетом поглощения и задержания воды;
- расчет динамического запаса воды на склонах и притока воды в русловую сеть;
- расчет руслового добегания притока к замыкающему створу.

Характерной особенностью горных территорий является «пестрота» в распределении ландшафтов, вызванная значительными территориальными градиентами естественной теплообеспеченности. По этой причине ландшафтно-гидрологическая основа, обеспечивающая реализацию модели формирования речного стока, не может включать такие локальные природные геосистемы, как фауна, урочище, местность. В этом случае придется выделить многие сотни мелких природных комплексов даже в небольшом бассейне, которые не-

возможно обеспечить гидрометеорологической информацией. С учетом сказанного в основу разработки концептуальных моделей прогноза речного стока целесообразно положить следующие принципы ландшафтно-гидрологического районирования бассейна [11, 12]:

1. Основным требованием при выделении гидрологических районов является пространственная коррелированность временных колебаний метеорологических характеристик в пределах выделенного района, позволяющая приближенно учесть их изменчивость с использованием данных наблюдений ограниченного числа пунктов. Желательно, чтобы в пределах района коэффициенты парной корреляции средней суточной температуры воздуха в пунктах наблюдений были бы достаточно высокими (не менее 0,70–0,80). То же самое относится и к декадным суммам паводкообразующих осадков. В этом случае один район может «накрывать» площадь до 30–50 тыс. км<sup>2</sup>, что соответствует размерам средней реки. В крупных речных бассейнах возникает необходимость выделения не одного, а нескольких районов.
2. Учет пространственного разнообразия элементов ландшафта внутри каждого района осуществляется путем его расчленения на высотные зоны. Тем самым учитывается высотная поясность ландшафтно-климатических условий. Таким образом, горная территория достаточно крупного бассейна делится на районы и высотные зоны, тогда как в бассейнах малых и средних рек выделяются только высотные зоны. При таком подходе исходной территориальной единицей осреднения гидрометеорологических характеристик в бассейнах горных рек является высотная зона.

Бассейн бокового притока Богучанского водохранилища (площадь 47000 км<sup>2</sup>) представляет плато с широкими и плоскими междуречьями, частично заболоченными. Преобладающие высоты 200–500 м. Судя по размерам водосбора и характеру ландшафта, районы в бассейне выделять целесообразно. Следовательно, исходными территориальными единицами осреднения гидрометеорологических характеристик являются высотные зоны, которых, как упомянуто выше, выделено четыре, с превышениями 100 м.

Расчет суммарной водоотдачи в период снеготаяния для  $i$ -й высотной зоны речного бассейна ( $i=1,2,3,4$ ) выполняется на основе уравнения инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова [10, 13]:

$$Y_i(t) = (1 - w_i) \left\langle H_i(t) - P_0 th \left[ \frac{H_i(t)}{P_0} \right] \right\rangle, \quad (1)$$

где  $w_i$  – доля постоянно бессточной площади для  $i$ -й высотной зоны;  $t$  – время;  $P_0$  – водоудерживающая емкость бассейна в условиях наиболее низкого предшествующего (осеннего) увлажнения;  $th$  –

функция гиперболического тангенса;  $H_i(t)$  – интегральный слой воды, поступивший на поверхность  $i$ -й высотной зоны за период от начала снеготаяния  $t_0$  до момента  $t$

$$H_i(t) = U_i + \sum_{j=t_0}^{j=t} (h_{ci} + x_i - z_i - I)_j, \quad (2)$$

где  $U_i$  – слой заполнения водоудерживающей емкости перед началом снеготаяния;  $h_{ci}$ ,  $x_i$ ,  $z_i$  – соответственно слой талой воды, слой осадков и слой испарившейся воды за текущий интервал  $j$  в пределах  $i$ -й высотной зоны;  $I$  – количество просочившейся воды через иллювиальные (или подпахотные) горизонты за пределы почвенной водоудерживающей емкости. Просачивание  $I$  приближенно принимается равным суточному боковому притоку воды в водохранилище в конце типовой кривой спада (мм/сут), характеризующему среднее пополнение подземного (базисного) стока.

Слой заполнения емкости  $U_i$  перед началом снеготаяния формируется в результате выпадения предшествующих дождей и миграции влаги в зимний период к фронту промерзания. Перед началом снеготаяния слой воды  $U_i$  находится в замерзшем состоянии. Он аппроксимируется логарифмической формулой

$$U_i = d + c \cdot \lg(m + 1) + \text{grad}U \left( \frac{\Delta Z_i}{100} \right), \quad (3)$$

где  $d$  и  $c$  – коэффициенты;  $m$  – комплексный показатель водопроницаемости почв бассейна, учитывающий осеннее увлажнение и промерзание;  $\text{grad}U$  – градиент, учитывающий высотное изменение слоя начального заполнения водоудерживающей емкости;  $\Delta Z_i = Z_i - Z_1$  – превышение  $i$ -й высотной зоны [10].

В качестве характеристики водопроницаемости почв в [4] рассмотрен ряд показателей предвесеннего состояния речного бассейна. В результате статистического анализа получено эмпирическое уравнение для комплексного показателя  $m$ :

$$m = 2,14Q - 36,0t_2 + 200,0, \quad (4)$$

где  $Q$  – средний расход воды за ноябрь в замыкающем створе бассейна р. Чалобец – с. Яркино;  $t_2$  – температура почвы на глубине 0,2 м по станции Ванавара за февраль.

Расход воды за ноябрь в формуле (4) косвенно характеризует предзимнее увлажнение бассейна. В формуле (4) февральская температура почвы на глубине 0,2 м косвенно характеризует льдистость почвы: чем ниже температура, тем интенсивнее осуществляется миграция почвенной влаги к фронту промерзания, соответственно увеличивается льдистость почвы и происходит закупорка почвенных пор льдом [9, 11].

Уравнение (1) используется для расчета водоотдачи высотной зоны  $u_i(t)$ , под которой, согласно Е.Г. Попову, понимается слой стока, образующийся на склонах за расчетную единицу времени (сутки):

$$u_i(t) = Y_i(t) - Y_i(t-1). \quad (5)$$

Склоновый приток в русловую сеть  $q_i(t)$  определяется с учетом его зависимости от динамического (гравитационного) запаса воды на склонах  $W_i$  [10]:

$$\begin{cases} W_i(t) = W_i(t-1) + u_i(t) - q_i(t), \\ q_i(t) = \alpha_i \left[ \frac{W_i(t-1) + W_i(t)}{2} \right]^n, \end{cases} \quad (6)$$

где  $n$  – параметр (показатель степени);  $\alpha_i$  – коэффициент, интегрально характеризующий гидравлические условия склонового стока.

Система уравнений (6) позволяет методом итераций вести непрерывный расчет притока воды в русловую сеть в период снеготаяния.

Важным фактором, определяющим сопротивление движению воды на склонах, является снежный покров. В начальный период снеготаяния значительная часть образовавшейся воды накапливается под снегом и не поступает в русловую сеть. По мере схода снега наблюдается «прорывной» механизм формирования притока воды в русловую сеть. Для определения  $\alpha$  в [14] предложены следующие эмпирические зависимости. В период снеготаяния

$$a_i(t) = a_0 \exp \left[ \frac{-\beta S o_i(t-1)}{W_i(t-1) + 1} \right], \quad (7)$$

где  $\alpha_0$  – максимальные значения  $\alpha$ , наблюдаемое при отсутствии снежного покрова на склонах;  $S o_i(t-1)$  – оставшийся снегозапас на склонах в предшествующие сутки (после схода снега при  $S o_i(t-1)=0$  получим  $\alpha=\alpha_0$ );  $\beta$  – коэффициент, учитывающий эффект снижения скоростей склонового стока вследствие сопротивления снежного покрова. Согласно (7), скорости склонового стока увеличиваются при снижении оставшегося на склонах снегозапаса и возрастании динамического запаса воды.

При похолоданиях, когда температура воздуха становится отрицательной и сопротивление возрастает из-за появления ледовых образований, рекомендуется следующее приближенное соотношение для  $a_i(t)$ :

$$a_i(t) = \frac{a_i(t-1)}{(1 + 0,33 |\theta^\circ|)}, \quad (8)$$

где  $|\theta^\circ|$  – абсолютное значение величины отрицательной среднесуточной температуры воздуха. Коэффициент 0,33 (в знаменателе) может быть уточнен методом оптимизации при наличии наблюдений на малых реках.

Поступление воды за расчетную единицу времени  $\Delta t$  за счет таяния почвенного льда ( $U_i$ ) также учитывается в расчетах водоотдачи высотных зон бассейна. Предполагается, что таяние почвенного льда начинается сразу же после схода снега, с появлением проталин. Расчет суточного таяния почвенного льда осуществляется по выражению, вы-

текающему из формулы Стефана: слой растаявшей воды пропорционален корню квадратному из суммы среднесуточных положительных температур воздуха за соответствующий период. Методика приближенного учета этих явлений рассмотрена в [14].

Суммарный приток в русловую сеть  $q_i(t)$  (мм/сут) рассчитывается отдельно для каждой высотной зоны. Далее определяется среднее взвешенное значение бокового притока для всего бассейна

$$q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \varphi_i, \quad (9)$$

где  $\varphi_i$  – доля площади  $i$ -й высотной зоны;  $n=4$  – число высотных зон.

Прогноз расхода воды выполняется с учётом принципа суперпозиции по следующему выражению [10]:

$$Q(t + \Delta t) = \left[ \int_0^{t+\Delta t} q(t + \Delta t - \tau) f_h(\tau) d\tau \right] + Q_w(t + \Delta t) + Q_{\min}, \quad (10)$$

где  $Q(t+\Delta t)$  – расход воды в замыкающем створе;  $t$  – дата выпуска прогноза;  $\Delta t$  – заблаговременность прогноза;  $f_h(\tau)$  – бассейновая кривая добега бокового притока;  $Q_w(t+\Delta t)$  – составляющая расхода воды, обусловленная истощением начального (на момент выпуска прогноза  $t$ ) запаса воды в русловой сети бассейна;  $Q_{\min}$  – устойчивое подземное («базисное») питание реки.

В расчетное выражение (10) входят кривая добега  $f_h(\tau)$  бокового притока, характеризующая последовательность прохождения во времени через замыкающий створ объёмов воды, поступивших в русловую сеть. Для ее описания использован подход, основанный на вероятностной трактовке кривой добега [10], рассматривающий эту кривую как плотность распределения времени добега элементарных объёмов воды.

Первый член правой части формулы (10) характеризует составляющую расхода воды в момент  $(t+\Delta t)$ , обусловленную поступлением талых и дождевых вод за период заблаговременности прогноза. Для определения второго члена правой части  $Q_w(t+\Delta t)$  разобьем рассматриваемую русловую сеть на участки. В пределах каждого  $i$ -го участка располагается  $i$ -й пункт наблюдений за уровнями воды. Запас воды в русловой сети представим в виде

$$W_i(t) = \sum_{i=1}^m \omega_i(H_i(t)) L_i, \quad (11)$$

где  $\omega(H_i(t))$  – площадь поперечного сечения на  $i$ -м участке, как функция уровня воды  $H_i(t)$ ;  $L_i$  – длина участка (сумма берется по всем  $m$  участкам).

Представим площадь поперечного сечения на  $i$ -м участке в виде нелинейной функции уровня воды и введем кривую добега  $f_h(\tau)$  русловых запасов  $W_i(t)$ . Тогда выражение для прогноза притока воды получает вид [10]:

$$Q(t + \Delta t) = \left[ c_0 \int_0^{\Delta t} q(t + \Delta t - \tau) f_h(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^m c_i (H_i(t) - H_{i \min})^{y_1} + \sum_{i=1}^m c_{i+m} (H_i(t) - H_i(t-1)) \right] + Q_{\min}. \quad (12)$$

Формула (12) учитывает как метеорологические факторы (атмосферные осадки, температуру воздуха), так и гидрологические (уровни воды в речной системе), т. е. является комбинированной моделью. Сборные коэффициенты ( $c_0, c_1, c_2, \dots$ ) в (12) определяются в процессе оптимизации параметров прогностической модели. Преимущество рассмотренного подхода состоит в том, что при наличии многолетних данных наблюдений, позволяющих выполнить оптимизацию параметров модели, отсутствует необходимость в громоздких расчетах запаса воды в речной сети. Также не требуется рассчитывать ординаты кривой добегаания русловых объемов  $W_i(t)$ : они учитываются через сборные коэффициенты  $c_i$ .

#### Результаты исследования

Как подметил Э.М. Ольдекоп [15], существует приближенное соотношение между суммами зимних осадков, выпавших за одинаковые календарные периоды на нижних и верхних высотных уровнях горного склона за конкретный год. Зная модульный коэффициент запаса воды в снеге по данным снегомерной съемки на опорной метеостанции  $m_0 = S_0 / \bar{S}_0$  (где  $S_0$  и  $\bar{S}_0$  – соответственно запас снега перед началом снеготаяния за конкретный год и его среднее многолетнее значение), можно рассчитать снеговзапас  $S(H)$  для высотной зоны  $H$ . Для этого должна быть известна средняя многолетняя величина запаса снега  $\bar{S}(H)$  для этой высотной зоны. Очевидно,

$$S(H) = m_0 \bar{S}(H). \quad (13)$$

Заметим, что  $S_0$  и  $\bar{S}_0$  на опорной станции рассчитываются с учетом снеговзапаса на этой станции и количества осадков  $\Delta X_{0H}$ , выпавших за период от даты начала снегонакопления на высоте  $H$  до той же даты на высоте опорной станции.

Для исследуемой территории распределение средних многолетних значений запаса снега по высотным зонам  $\bar{S}(H)$  получено с использованием данных снегомерных съемок Росгидромета. Карта изолиний средних многолетних запасов воды в снежном покрове в средней части бассейна Енисея и нижней Ангары представлена на рис. 2.

За конкретные годы запасы воды в снежном покрове для высотных зон рассчитываются по формуле (13). Далее, зная температуру воздуха, по методике А.Г. Ковзеля [16] рассчитываются ход суточного поступления талой воды на поверхность почвы и размеры покрытой снегом площади для

высотных зон. С другой стороны, информацию о динамике площади снегового покрытия можно получить на основе космического мониторинга [17–20]. Специальное программное обеспечение позволяет обрабатывать спутниковую информацию в автоматическом режиме. Космические изображения, которые послужили основой для определения заснеженности, были отобраны для случаев с облачностью, не превышающей 5 %.

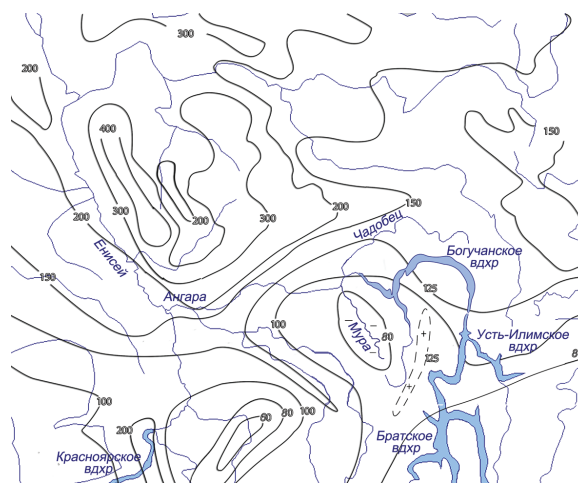


Рис. 2. Норма запасов воды в снежном покрове (мм) перед началом снеготаяния в бассейне Среднего Енисея и Ангары [4]

Fig. 2. Norm of water reserves in snow cover (mm) in the basin of the Middle Yenisei and Angara before snow melting [4]

Для бассейна бокового притока Богучанского водохранилища выполнено сопоставление временного хода заснеженности в периоды снеготаяния по высотным зонам за 2010–2015 гг., рассчитанного по модели и по спутниковым данным. Если оценки заснеженности по данным космической информации заметно отличаются от рассчитанных значений, то следует производить корректировку параметров блока модели, рассчитывающего ход заснеженности. Прежде всего речь идет об уточнении распределения средних многолетних значений запаса снега по высотным зонам  $S-(H)$ . Выполненное сравнение хода «космической» и рассчитанной («модельной») заснеженности для исследуемого бассейна показало их близкое совпадение, что подтвердило реальность полученной оценки хода снеготаяния в исследуемом бассейне. Корректировка  $S-(H)$  в этом случае не проводилась.

Оптимизация параметров модели выполнена по следующим данным наблюдений гидрометеорологической сети за период с 1978 по 2012 г.:

- ежедневные расходы (уровни) воды на 3-х гидрологических постах (р. Мура – с. Ирба, р. Чадобец – с. Яркино, р. Непа – с. Ика);
- ежедневные данные о суточных величинах осадков и температуры воздуха по 5 станциям (п. Абан, с. Богучаны, п. Чемдальск, с. Ванавара, г. Тайшет);

- данные о запасах воды в снежном покрове по 8 станциям на конец второй декады марта (с. Ванавара, п. Чемдальск, с. Богучаны, п. Мотыгино, д. Бедома, с. Ирба, п. Северо-Енисейский, п. Татарка).

В процессе оптимизации параметров модели определены значения коэффициентов ( $w_i, P_0, d, c, \text{grad}U, \alpha_0, \beta, c_0, c_1, c_2, \dots$ ) и показателей степени ( $n, y1$ ) в математических соотношениях модели (формулы 1, 3, 4, 6, 7, 8, 12). Оптимизация неизвестных параметров выполняется в двух вариантах:

- а) без учёта уровней воды по длине речной системы (модель «снеготаяние–осадки–сток»):

$$Q(t + \Delta t) = \left[ \int_0^{t+\Delta t} q(t + \Delta t - \tau) f_h(\tau) d\tau \right] + Q_{\min}; \quad (14)$$

- б) комбинированная модель, учитывающая дополнительно уровни воды по длине речной системы (формула 12).

Искомые параметры можно разделить на три группы:

- 1) параметры склонового притока воды в русловую сеть ( $w_i, P_0, d, c, \text{grad}U, \alpha_0, \beta$ );
- 2) параметры кривых руслового добегания;
- 3) параметры, отражающие влияние начальных (на дату выпуска прогноза) запасов воды в русловой сети ( $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n+1}, c_{n+2}, c_{n+3}, \dots, y1$ ).

Первые две группы параметров оптимизируются для варианта «а» (14), параметры третьей группы определяются для варианта «б» (комбинированная модель, формула 12). Все параметры, полученные в процессе оптимизации варианта модели «а», в дальнейшем без изменений используются в комбинированной модели «б».

В бассейне бокового притока Богучанского водохранилища преобладают светлохвойные леса с наибольшим распространением сосны. Наличие легких супесчаных и водопроницаемых хрящеватых почв объясняет значительную долю площади, на которой отсутствует поверхностный сток ( $w_i$ ). Особенно велика она для нижней высотной зоны бассейна. По результатам оптимизации ее доля для всего бассейна составляет 0,38 (или 38 %).

На рис. 3 представлена зависимость слоя заполнения емкости  $U_i$  рассматриваемого бассейна перед началом снеготаяния от комплексного показателя водопроницаемости почв бассейна ( $m$ ). Она рассчитана по формуле (3) после подстановки значений оптимальных параметров для четырех высотных зон бассейна.

Напомним, что превышение высотных зон составляет 100 м. Увеличение слоя  $U_i$  между первой и четвертой зоной ( $\Delta U = U_4 - U_1$ ) при заданном значении  $m$  составляет примерно 7 мм. При изменении косвенного показателя водопроницаемости почв ( $m$ ) в пределах от 0 до 35 слой заполнения емкости  $U_i$  увеличивается на 18 мм (рис. 3). Расчеты показывают, что соответствующие изменения притока в русловую сеть, выраженного в мм слоя, имеют тот же порядок.

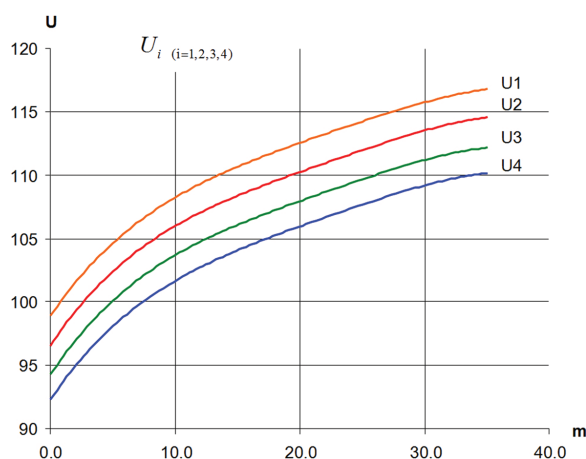


Рис. 3. Зависимость  $U_i(m)$ , рассчитанная по формуле (3) для высотных зон бассейна

Fig. 3. Dependence  $U_i(m)$  calculated by the formula (3) for high rise areas of the basin

Напомним, что в практике гидрологических прогнозов за критерий качества принимается отношение средней квадратичной ошибки прогноза  $\sigma_n$  к среднему квадратичному отклонению расхода воды за период заблаговременности прогноза  $\sigma$ . На основе расчетов, выполненных по материалам независимых наблюдений, получены критерии качества прогноза ( $\sigma_n/\sigma$ ) от 0,312 до 0,575, при заблаговременности прогноза от 1 до 7 суток (см. табл.), что указывает на «хорошую» оценку качества.

Таблица. Показатели точности модели прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС

Table. Indicators of accuracy in forecasting lateral inflow models in Boguchanskaya HPP reservoir

Заблаговременность прогноза, сутки Earliness of forecast, day	Средняя квадратичная ошибка прогноза $\sigma_n$ , м <sup>3</sup> /с Mean-square prediction error $\sigma_n$ , m <sup>3</sup> /s	Среднее квадратичное отклонение расхода воды за период заблаговременности прогноза $\sigma$ , м <sup>3</sup> /с Mean-square deviation of water flow over the advance time period of the forecast $\sigma$ , m <sup>3</sup> /s	Критерий качества $\sigma_n/\sigma$ Forecast performance criterion $\sigma_n/\sigma$
1	54,6	94,9	0,575
2	90,5	182	0,497
3	114	260	0,438
4	129	331	0,391
5	139	395	0,352
6	146	453	0,322
7	158	507	0,312

Полученные оценки качества модели позволяют рекомендовать её для оперативных краткосрочных прогнозов бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС. На рис. 4 представлены гидрографы притока воды в Богучанское водохранилище за 2014 и 2015 гг., рассчитанные гидрометрическим методом и по прогностической модели.

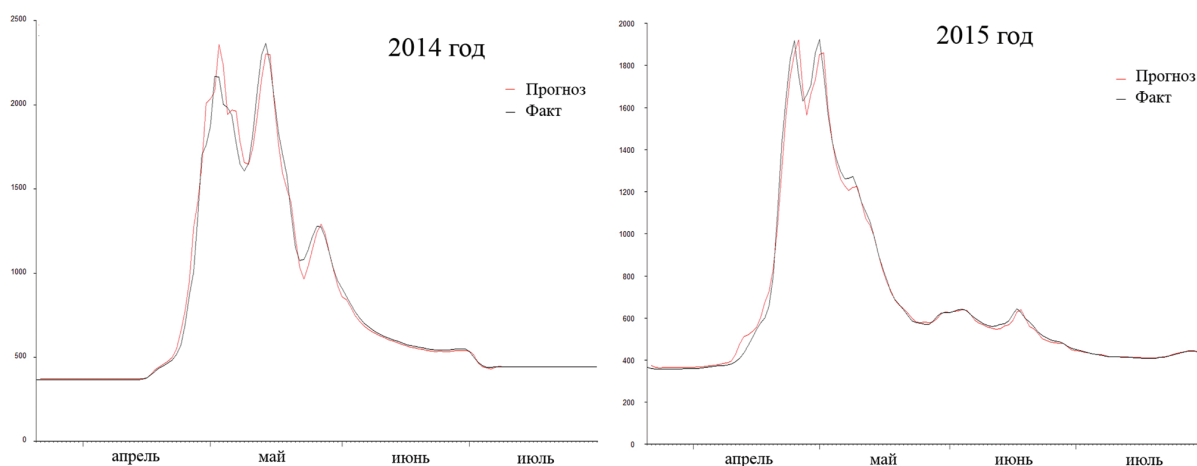


Рис. 4. Фактические и рассчитанные по математической модели (заблаговременность – 2 дня) гидрографы притока воды за 2014 и 2015 гг.

Fig. 4. Real and calculated by a mathematical model (earliness is 2 days) hydrographs of water inflow for 2014 and 2015

### Заключение

Прогноз весеннего стока сводится к определению запасов воды в снежном покрове, расчету интенсивности снеготаяния, оценке поглощения воды на склонах бассейна. Основным фактором потери весеннего стока в рассматриваемых условиях является осеннее увлажнение водосборов. Исследования показали, что на потери весеннего стока влияют условия промерзания почвы. Чем ниже зимняя температура воздуха и больше степень предзимнего увлажнения почв бассейна, тем большее количество влаги подтягивается к фронту промерзания. Этим, на наш взгляд, объясняются положительные результаты применения комплексного показателя ( $m$ ) для характеристики начального состояния бассейна.

Концептуальная модель прогноза суточного притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС включает следующие блоки: снегонакопление, снеготаяние, поглощение воды на склонах, склоновый приток в русловую сеть, русловое доб-

егание воды. Реализована модель, в которой используется не только наземная, но и спутниковая информация о динамике площади снегового покрытия бассейна в период снеготаяния. Точность кратко- и среднесрочных прогнозов по рассматриваемой модели существенно повышается благодаря учету запасов воды в русловой сети на дату выпуска прогноза по уровням воды, измеряемым в пунктах наблюдений в речной системе. Реализация модели дает возможность точнее исследовать режим речного стока. Появляется возможность получения количественных характеристик снегонакопления, снеготаяния и водоотдачи бассейна по высотным зонам в условиях ограниченной гидрометеорологической информации, а также в условиях, когда лишь немногие параметры гидрометеорологических процессов могут быть реально измерены.

Проведенные испытания метода прогноза на независимом материале наблюдений за 2014 и 2015 гг. показали его эффективность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нежиховский Р.А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ и озер. – Л.: Гидрометеоздат, 1961. – 295 с.
2. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2007. – 436 с.
3. Савичев О.Г., Краснощечков С.Ю., Наливайко Н.Г. Регулирование речного стока. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 114 с.
4. Путинцев Л.А. Методика долгосрочного прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС на р. Ангаре // Вестник ТГУ. – 2015. – № 398. – С. 243–250.
5. Vijay P. Singh. Computer Models of Watershed Hydrology. – Littleton: Water Resources Publ., 2012. – 1144 p.
6. The distributed model intercomparison project – Phase 2: motivation and design of the Oklahoma experiments / M.B. Smith, V. Koren, S. Reed, Z. Zhang, Yu. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, N. Mizukami, E.A. Anderson, B.A. Cosgrove // J. Hydrol. – 2012. – P. 3–16, 418–419.
7. The distributed model intercomparison project. Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments / M. Smith, V. Koren, Z. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, B. Cosgrove, N. Mizukami, D. Kitzmiller, F. Ding, S. Reed, E. Anderson, J. Schaake, Y. Zhang, V. Andréassiane, C. Perrine, L. Coron, A. Valéry, B. Khakbaz, S. Sorooshian, A. Behrangi, B. Imam, K.L. Hsu, E. Todini, G. Coccia, C. Mazzetti, E.O. Andres, F. Francés, I. Orozco, R. Hartman, A. Henkel, P. Fickenschner, S. Staggs // Journal of Hydrology. – 2013. – № 507. – P. 300–329.
8. Karamouz E. Adams, Pagano Th.C. Flood Forecasting: a Global Perspective. – San Diego: Academic Press, 2016. – 478 p.
9. Karamouz M., Nazif S., Falahi M. Hydrology and Hydroclimatology. Principles and Applications. – Boca Raton: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. – 716 p.

10. Бураков Д.А., Каропова Е.Д., Шайдуров В.В. Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы // Вестник Красноярского государственного университета (физико-математические науки). – 2006. – Вып. 4. – С. 3–19
11. Бураков Д.А., Горошко Н.В. Ландшафтно-гидрологическое районирование в моделях прогноза речного стока (на примере бассейна Верхней Оби) // Географическая наука, туризм и образование: современные проблемы и перспективы развития: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск: НГПУ, 2015. – С. 14–17.
12. Semenova O., Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modeling // Hydrological Processes. – 2015. – № 29. – P. 2074–2078.
13. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 395 с.
14. Бураков Д.А., Адамович А.А. Учет весенних заморозков в математической модели прогноза наводнений в бассейне Енисея // Труды VII научной конференции «Современные методы математического моделирования». Т. 1. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2003. – С. 14–21.
15. Ольдекоп Э. М. Зависимость режима р. Чирчик от метеорологических факторов // Материалы по вопросу зависимости режима Туркестанских рек от метеорологических факторов. – Чирчикский отдел земельных улучшений в Туркестане. – 1918. – Вып. 1. – С. 15–27.
16. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 419 с.
17. Riggs G.A., Hall D.K., Salomonson V.V. MODIS Snow Products. User guide to Collection 5. November 2006. 80 p. URL: [http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug\\_c5.pdf](http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug_c5.pdf) (дата обращения: 05.04.2016 г.).
18. Yong-Keun Lee, Cezar Kongoli, Jeffrey Key. An In-Depth Evaluation of Heritage Algorithms for Snow Cover and Snow Depth Using AMSR-E and AMSR2 Measurements // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – April 2016. – V. 33. – № 4. – P. 2319–2336.
19. Zotov L., Shum C., Frolova N. Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE // Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances. – Heidelberg: Springer Geophysics, 2015. – P. 45–59.
20. Seasonal variability of the Western Siberia wetlands from satellite radar altimetry / E.A. Zakharova, A.V. Kouraev, F. Rémy, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // Journal of Hydrology. – 2014. – № 512. – P. 366–378. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.002>.

*Поступила 09.04.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Бураков Д.А.**, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой природообустройства Института землеустройства, кадастров и природообустройства Красноярского государственного аграрного университета.

**Путинцев Л.А.**, ведущий гидролог отдела гидрологических прогнозов ФГБУ «Среднесибирское УГМС».



UDC 556.06; 556.166; 556; 512

## SHORT-TERM FORECAST OF LATERAL INFLOW IN BOGUCHANSKAYA HYDROPOWER STATION RESERVOIR

Dmitry A. Burakov<sup>1</sup>,  
daburakov@yandex.ru

Lev A. Putintsev<sup>2</sup>,  
leo77789@mail.ru

<sup>1</sup> Krasnoyarsk State Agrarian University,  
90, Mira street, Krasnoyarsk, 660049, Russia.

<sup>2</sup> Federal State Budget Institution «Srednesibirskoye UGMS»,  
28, Surikov street, Krasnoyarsk, 660049, Russia.

**Relevance of the work.** Boguchanskaya hydropower station on the Angara river was put into operation in 2014. It is one of the largest hydraulic engineering constructions in Eastern Siberia. Boguchanskaya hydropower station is designed to meet the growing energy deficit. At project operating mode of the hydropower station, the level of the reservoir should be changed within  $\pm 0,5$  m. The reliable short-term forecasts of lateral inflow are required at such slight alteration of the level for preventing the situations related to overflow of Boguchanskaya hydropower station reservoir. The existing method of calculation and forecast of the lateral inflow is out of date. This fact defines the relevance of the research.

**The main aim** of the study is to implement the mathematical model of river flow formation under landscape-hydrological conditions of Boguchanskaya hydropower station reservoir basin for short-term (1–7 days) forecasts of lateral inflow.

**The methods used in the study:** water balance method, geographical and hydrological method, mathematical modeling of flow formation.

**The results.** The mathematical model of the water flow formation was adapted based on convolution integral for short-term forecasting of the inflow into Boguchanskoe reservoir at the Angara river (the Russian Federation). The paper introduces the landscape-hydrological base that ensures the model implementation. The authors have estimated snow accumulation on the territory of the lateral inflow basin in Boguchanskoe reservoir, using a land-based snow-shooting of Rosgidromet and satellite information on the dynamics of snow cover. A complex index of soil water permeability of the basin was substantiated. The index takes into account autumn moistening and soil freezing. The authors developed the technique of the short-term forecast of the lateral inflow into the Boguchanskaya hydropower station reservoir.

### Key words:

Spring flood, conceptual model of flow formation, hydrological forecasts, Boguchanskaya HPP, lateral inflow.

### REFERENCES

1. Nezhilovskiy R.A. *Gidrologicheskiye raschety i prognozy pri ekspluatatsii vodokhranilishch i ozer* [Hydrological calculations and forecasts in use of reservoirs and lakes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961. 295 p.
2. Georgiyevskiy Yu.M., Shanochkin S.V. *Gidrologicheskiye prognozy* [Hydrological forecasts]. St.-Petersburg, RGGMU Publ., 2007. 436 p.
3. Savichev O.G., Krasnoshchekov S.Yu., Nalivayko N.G. *Regulirovaniye rechnogo stoka* [Regulation of river flow]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009. 114 p.
4. Putintsev L.A. Method of long-term forecasting of lateral inflow into Boguchanskaya HPP reservoir on the Angara river. *Vestnik of Tomsk State University*, 2015, no. 398, pp. 243–250. In Rus.
5. Vijay P. Singh. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Littleton, Water Resources Publ., 2012. 1144 p.
6. Smith M., Koren V., Zhang Z., Zhang Y., Reed S., Cui Z., Moreda F., Anderson E., Cosgrove B., Mizukami N. DMIP 2 Participants, Overall results of the DMIP 2 Oklahoma experiments. *J. Hydrol.* 2012, pp. 3–16, 418–419.
7. Smith M., Koren V., Zhang Z., Moreda F., Cui Z., Cosgrove B., Mizukami N., Kitzmiller D., Ding F., Reed S., Anderson E., Schake J., Zhang Y., Andréassiane V., Perrine C., Coron L., Valéry A., Khakbaz B., Sorooshian S., Behrangi A., Imam B., Hsu K.-L., Todini E., Coccia G., Mazzetti C., Andres E.O., Francés F., Orozco I., Hartman R., Henkel A., Fickensch P., Staggs S. The distributed model intercomparison project. Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments. *Journal of Hydrology*, 2013, no. 507, pp. 300–329.
8. Karamouz E. Adams, Th.C. Pagano. *Flood Forecasting: a Global Perspective*. San Diego, Academic Press, 2016. 478 p.
9. Karamouz M., Nazif S., Falahi M. *Hydrology and Hydroclimatology. Principles and Applications*. Boca Raton, CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. 716 p.
10. Burakov D.A., Karepova E.D., Shaydurov V.V. Mathematical modeling of water flow: theoretical foundations, current status and prospects. *Bulletin of Krasnoyarsk State University (Physics and mathematics)*, 2006, vol. 4, pp. 3–19.
11. Burakov D.A., Goroshko N.V. Landshaftno-gidrologicheskoye rayonirovaniye v modelyakh prognoza rechnogo stoka (na primere basseyna Verkhney Obi) [Landscape-hydrological regionalization in models of forecasting river flow (by the example of the Upper Ob Basin)]. *Materialy IV Vserossiyskoy konferentsii* [Materials of the IV All-Russian conference]. Novosibirsk, NSPU, 2015. pp. 14–17.
12. Semenova O., Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 2015, vol. 29, pp. 2074–2078.
13. Popov E.G. *Voprosy teorii i praktiki prognozov rechnogo stoka* [Theory and practice of river flow forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1963. 395p.

14. Burakov D.A., Adamovich A.A. Uchet vesennikh zamorozkov v matematicheskoy modeli prognoza navodneniy v bassejne Yeniseya [Consideration of spring frosts in the mathematical model of flood prediction in the Yenisei basin]. *Trudy VII nauchnoy konferentsii «Sovremennye metody matematicheskogo modelirovaniya»* [Modern methods of mathematical modeling. Proc. VII scientific conference]. Krasnoyarsk, IVM SO RAN, 2003. Vol. 1, pp. 14–21.
15. Oldekop E.M. Zavisimost rezhima r. Chirchik ot meteorologicheskikh faktorov [Dependance of the Chirchik river mode on meteorological factors]. *Materialy po voprosu zavisimosti rezhima Turkestanskikh rek ot meteorologicheskikh faktorov* [Materials on the issue of Turkestan river mode dependence on meteorological factors]. Tashkent, 1918. Vol. 1, pp. 15–27.
16. Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Kurs gidrologicheskikh prognozov* [Course of hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 419 p.
17. Riggs G.A., Hall D.K., Salomonson V.V. *MODIS Snow Products. User guide to Collection 5*. November 2006. 80 p. Available at: [http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug\\_c5.pdf](http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug_c5.pdf) (accessed 05.04.2016).
18. Yong-Keun Lee, Cezar Kongoli, Jeffrey Key «An In-Depth Evaluation of Heritage Algorithms for Snow Cover and Snow Depth Using AMSR-E and AMSR2 Measurements». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, April 2016, vol. 33, no. 4, pp. 2319–2336.
19. Zotov L., Shum C., Frolova N. Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE. *Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances*. Heidelberg, Springer Geophysics, 2015. pp. 45–59.
20. Zakharova E.A., Kouraev A.V., Rémy F., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Seasonal variability of the Western Siberia wetlands from satellite radar altimetry. *Journal of Hydrology*, 2014, no. 512, pp. 366–378.

Received: 9 April 2016.

#### Information about the authors

**Dmitry A. Burakov**, Dr. Sc., professor, Krasnoyarsk State Agrarian University.

**Lev A. Putintsev**, lead hydrologist, Federal State Budget Institution «Srednesibirskoye UGMS».

УДК 622.243

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ОПЫТНЫХ РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ МЕХАНИЗМА РАБОТЫ БУРОВЫХ КОМПОНОВОК СО СМЕЩЕННЫМ ЦЕНТРОМ МАСС ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

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

Петенёв Павел Геннадьевич<sup>1</sup>,  
pavel-whait@mail.ru

<sup>1</sup> Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

**Актуальность работы:** необходимость повышения эффективности бурения геолого-разведочных скважин в сложных горно-геологических условиях, в том числе связанных с естественным искривлением скважин.

**Цель исследования:** разработка методики использования и конструкций буровых компоновок со смещенным центром масс (тяжести) поперечного сечения, позволяющих повысить эффективность бурения геолого-разведочных скважин.

**Методы исследования:** аналитические исследования, опытно-конструкторские работы и экспериментальные опытные работы.

**Результаты.** Разработаны теоретические положения, методика применения и конструкции буровых компоновок со смещенным центром тяжести поперечного сечения; проведены производственные испытания различных конструкций буровых компоновок со смещенным центром тяжести поперечного сечения при различных способах бурения.

**Выводы.** На основе разработанной модели движения буровых компоновок со смещенным центром тяжести поперечного сечения получены аналитические зависимости для расчета величин эксцентриситета оперечного сечения буровых компоновок, обеспечивающие их вращение вокруг оси скважины (вид  $\Phi_1$ ), а также длину вовлекаемого в режим вращения  $\Phi$  участка колонны, что позволяет создавать компоновки бурильной колонны, способные работать в более благоприятном режиме и обеспечивать повышение эффективности бурового процесса. На основе стандартных снарядов со съёмным кернаприемником типоразмера HQ разработаны и изготовлены трубы со смещенным центром тяжести, которые испытаны на производственных скважинах в составе компоновки, в которой размещено три трубы со смещенным центром тяжести поперечного сечения. Результаты испытаний показали, что в составе высокосбалансированных бурильных колонн снаряда со съёмным кернаприемником эффективно применение труб со смещенным центром тяжести: достигается снижение интенсивности естественного искривления скважин, снижается вибрация и затраты мощности на работу бурильной колонны.

### Ключевые слова:

скважина, бурение, бурильная колонна, компоновка, искривление скважины.

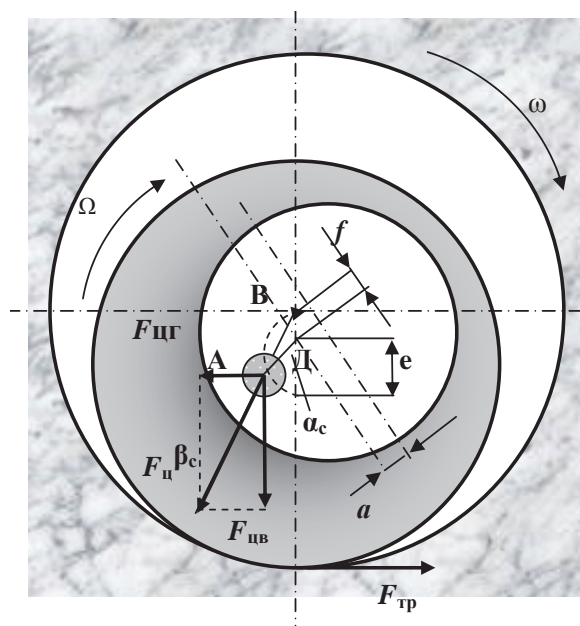
Бурение скважин в твердых и особенно анизотропных горных породах представляет из себя многофакторный процесс со многими влияющими на производственный результат условиями и параметрами.

Для снижения искривления скважин, буримых в анизотропных горных породах, например, созданы различные методики и технические средства [1–10]. Но с точки зрения повышения эффективности бурения, особенно алмазного высокочастотного бурения, данные разработки могут рассматриваться только как методы и средства вспомогательного характера, не влияющие непосредственно на рост производительности и ресурс бурового инструмента, повышение таких показателей, как выход керна и его качество. Исследования процесса алмазного бурения на стенде [11], многочисленные производственные данные указывают, что все основные показатели высокоэффективного бурения связаны с режимом работы бурильной колонны.

Современная технология алмазного бурения геолого-разведочных скважин в твердых породах предусматривает использование статически сбалансированных бурильных колонн с уменьшенными радиальными зазорами между колонной и стен-

кой скважины [11]. Особенно ярко эти свойства технологии бурения проявляются при применении системы алмазного бурения со съёмным кернаприемником (ССК) в зарубежном исполнении. ССК зарубежных компаний, таких как *AtlasCopco* и *Boart Longyear*, отличаются высоким качеством изготовления бурильных и колонковых труб (относительно равная толщина стенок, высокопрочная сталь) и высоким уровнем соосности резьбовых соединений, что позволяет характеризовать данные бурильные трубы и колонны, составленные из них, как высоко статически сбалансированные системы. Статическая сбалансированность колонн позволяет реализовать высокопроизводительное алмазное бурение на форсированных режимах, но зачастую лишь при проходке скважин в относительно благоприятных горно-геологических условиях. При сложном геологическом разрезе, в котором может происходить непредвиденное расширение ствола скважины, кавернообразование, искривление скважины в анизотропных и перемежающихся по твердости горных породах, при наклонном положении ствола скважины и др. сложных моментах, эффективность применения высоко сбалансированных бурильных колонн может быть недостаточной, поскольку любые статически сбалан-

сированные колонны оказываются динамически несбалансированными из-за высокой степени деформации под действием осевых и центробежных сил, что обеспечивает появление возмущающих равномерное вращение сил трения, и характер движения колонны становится вибрационным. Подобный режим работы колонны приводит к снижению эффективности бурения, поскольку колонна, по мере снижения жесткости и повышения параметров режима бурения, теряет свои качества канала передачи энергии и разрушающих усилий к забою скважины. Вследствие этого снижается механическая скорость бурения, повышается износ элементов колонны, растут затраты мощности на бурение, становится недостаточным выход керна, возрастает кривизна и снижается технологическая надежность регулирования направления и искривленности стволов скважин. В некоторой степени негативные проявления устраняются использованием различных смазывающих веществ, которые позволяют снизить силы трения в системе «колонна–скважина». Для снижения искривления скважин при бурении статически сбалансированными колоннами целесообразны центрированные колонковые наборы и иные компоновки [12–15].



**Рис. 1.** Схемы для анализа работы компоновки со смещенным центром тяжести поперечного сечения:  $\omega$  – направление вращения колонны, задаваемое буровым станком;  $\Omega$  – направление качения колонны по стенке скважины

**Fig. 1.** Schemes for analysis of operation of configuration with the displaced cross section mass center:  $\omega$  is the direction of a column rotation set by the drilling rig;  $\Omega$  is the direction of a column swing on a well wall

Согласно экспериментальным данным [11], наиболее устойчивым видом движения статически сбалансированных колонн на форсированных ре-

жимах является обратная процессия (гипоциклическое движение колонны, которое заключается в качении колонны по стенке скважины в обратную сторону от направления вращения колонны), с которой связаны все основные нежелательные влияния на процесс и показатели бурения.

Решение проблемы повышения показателей буровых работ, связанных с работой колонны, состоит в подборе значений параметров (системы «колонна–скважина»), которые снижают вероятность возникновения обратной процессии. С другой стороны, вид движения деформированной буровой компоновки, который бы обеспечивал минимальность кривизны ствола при бурении анизотропных горных пород, – вращение деформированной компоновки вокруг оси скважины (вид движения  $\Phi_1$ ) [11].

Один из путей решения проблемы эффективно бурения в сложных горно-геологических условиях – применение буровых компоновок со смещенным центром масс поперечного сечения (КСМ) [14, 15]. Среди этих разработок есть ряд запатентованных технических средств [16–19].

К настоящему времени накоплен некоторый опыт использования в бурении подобных технических средств [13]. Например, фирма *Xp. Por Drilling* использует УБТ типа *Woodpecker* с боковым смещением центра тяжести. Результаты использования таких УБТ показывают, что происходит рост механической скорости бурения на 24 %, расход долот (не смотря на рост скорости) не увеличивается, сокращается число усталостных поломок соединений труб, вибрация колонны уменьшается. Кроме того, отмечено улучшение качества ствола скважины, что положительно влияет на спуск колонн. Приведенные результаты работ фирмы *Xp. Por Drilling* полностью подтверждаются исследованиями, проводимыми специалистами КазИМСа и ИрГТУ при алмазном и бескерновом бурении геолого-разведочных скважин [13].

Механизм работы компоновок КСМ предусматривает проявление нового технического свойства динамической стабилизации или самоцентрирования, которое состоит в регулировании центробежной силы  $F_{ц}$  с одновременным обеспечением вида движения  $\Phi_1$ , что позволяет повысить эффективность бурения [13]. Опыт применения таких компоновок, размещаемых в нижней части бурильной колонны непосредственно над породоразрушающим инструментом [20], показал возможность как снижения искривления скважины, так и повышения таких показателей бурения, как механическая скорость, ресурс бурового инструмента, снижение вибрации и затрат мощности на бурение.

Анализ работы несбалансированных компоновок различного типа выполнялся в следующих работах [11, 12, 16, 20, 21].

При вращении КСМ в скважине с частотой  $\omega$  (рис. 1) усилие  $F_{ц}$  направлено из точки вращения колонны через центр тяжести поперечного сече-

ния. В точке контакта со стенкой скважины возникает сила трения  $F_{тр}$ , под действием которой КСМ занимает такое положение в скважине, при котором  $F_{ц}$  получает направленность с отклонением от точки контакта со стенкой скважины, что нехарактерно для бурильных труб с поперечным сечением в виде кольца. Угол  $\beta_c$  (рис. 1) вектора  $F_{ц}$  определяется в зависимости от направления вращения инструмента и суммы других факторов. При росте  $F_{ц}$ , например из-за повышения частоты

вращения,  $F_{тр}$  достигает величины  $F_{т.к.}$ , которая способна создать условия для качения КСМ в направлении  $\Omega$ , но качение может происходить лишь как проворот КСМ вокруг продольной оси своей наружной поверхности, поскольку при этом происходит уменьшение расстояния  $AB$  от центра тяжести поперечного сечения компоновки до оси вращения, что не дает роста центробежной силы, т. к. последняя пропорциональна этому расстоянию.

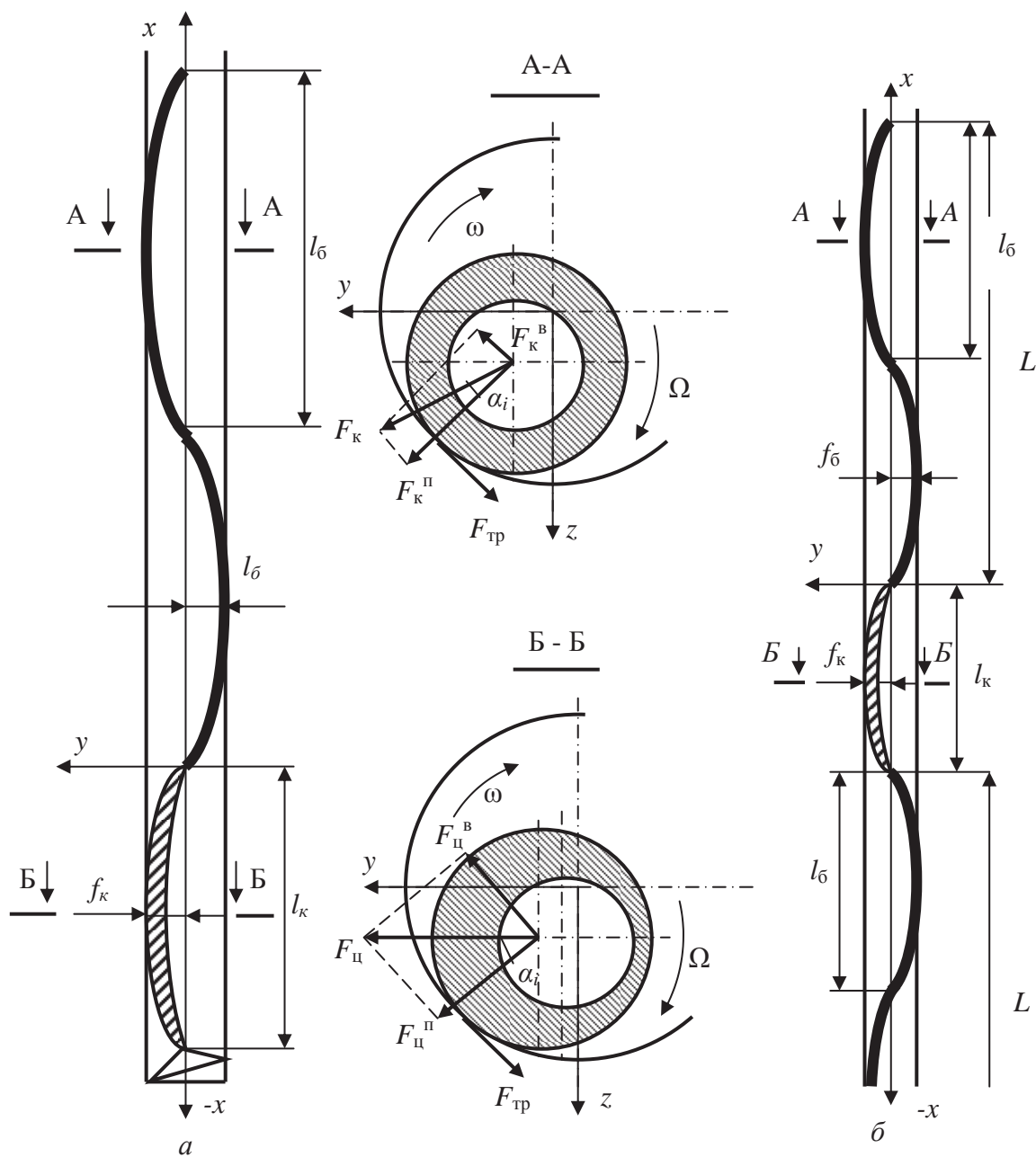


Рис. 2. Схемы для определения эксцентриситета центра масс буровой компоновки: а) над буровым инструментом; б) в составе бурильной колонны

Fig. 2. Schemes for defining the eccentricity of the mass center of the boring configuration: a) over the boring tool; б) as a part of a boring column

Таким образом, вероятностное повышение центробежной силы, соответственно, силы прижатия компоновки к стенке скважины и силы трения компоновки о стенку скважины, вызванное, например, ростом частоты вращения колонны, приводит только к провороту компоновки на угол  $\alpha_c$ , после чего устанавливается прежний (до повышения частоты вращения) уровень сил и их соотношение, а потому качения КСМ в скважине не происходит. Расстояние  $AB$ , из геометрических построений (рис. 1), равно:

$$AB = \frac{\sin \alpha_c e}{\sin \beta_c},$$

где  $\beta_c = \arctg \frac{\sin \alpha_c e}{(f + \cos \alpha_c e)}$ .

В формулах  $\alpha_c$  изменяется от 0 до 180 градусов, а расстояние  $AB$ , таким образом, от максимального  $(f+e)$  уменьшается по мере поворота компоновки и сближения центра тяжести поперечного сечения компоновки (точка А на рис. 1) с центром вращения компоновки (точка В) (при  $e=f$  это расстояние равно 0). При этом поворот КСМ происходит на угол, который уменьшает расстояние  $AB$  ровно на столько, насколько это требуется для предотвращения качения компоновки по стенке скважины. В результате практически всегда проявляется свойство КСМ обеспечивать в скважине вид движения  $\Phi_1$ .

Для вывода основных зависимостей расчета параметров КСМ рассмотрены действующие силы при бурении, когда нижняя часть колонны имеет равномерно распределенный по длине эксцентриситет центра масс в виде компоновки длиной  $l_k$  (рис. 2, а, б). В первом случае компоновка КСМ расположена в нижней части колонны, а во втором – в интервале сжатой зоны с некоторым шагом длиной  $L$ .

При вращении КСМ действует центробежная сила (рис. 2, а, б, сечение Б-Б):

$$F_n = \frac{(e+f)q_k \omega^2 l_k}{2g},$$

где  $f_k$  – прогиб КСМ в скважине, м;  $q_k$  – весовая характеристика КСМ, даН/м;  $\omega$  – частота вращения буровой колонны, с<sup>-1</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Вследствие проявляющейся силы трения  $F_{тр}$  компоновка проворачивается на угол  $\alpha_c$  и потому сила  $F_n$  ориентирована с некоторым смещением от точки контакта КСМ со стенкой скважины. В направлении точки контакта действует составляющая силы  $F_n$  – сила  $F_n^a = F_n \cos \alpha_c$ . Другая составляющая центробежной силы, которая определяет вид движения КСМ, будет равна:  $F_n^b = F_n \sin \alpha_c$ .

При вращении в режиме  $\Phi_1$  на полуволну буровой колонны оказывает действие также центробежная сила  $F_k$  и её составляющие  $F_k^a$  и  $F_k^b$ :

$$F_k = \frac{f_6 q_6 \omega^2 l_6}{2g}; \quad F_k^a = \cos \alpha_i; \quad F_k^b = \sin \alpha_i,$$

где  $f_6$  – прогиб буровых труб в скважине, м;  $q_6$  – весовая характеристика буровых труб колонны, даН/м;  $l_6$  – длина полуволны изгиба буровых труб, м;  $\alpha_i$  – угол поворота участка колонны под действием центробежной силы и силы трения колонны о скважину, град.

Угол  $\alpha_i$  может изменяться от  $\alpha_c$  до 0 последовательно от КСМ и до  $n$ -й полуволны колонны. Число полуволн  $n$ , вовлеченных КСМ в режим вращения  $\Phi_1$ , определяется величиной центробежной силы от вращающейся в скважине КСМ и силами сопротивления движению колонны в скважине. Если угол поворота КСМ равен  $\alpha_c$ , то для каждой последующей полуволны угол  $\alpha_i$  уменьшается на величину  $\alpha_c/n$ . Таким образом, для каждой полуволны угол  $\alpha_i$  будет равен:

$$\alpha_i = \alpha_c - \frac{\alpha_c (i-1)}{n}.$$

Выше компоновки КСМ участок колонны не имеет эксцентриситета центра масс и деформирован с числом полуволн изгиба от  $(i+1)$  до  $n$ , где  $i=1$ . Общее уравнение равновесия сил для участка колонны, двигающегося в режиме  $\Phi_1$ , вызванного работой КСМ, будет иметь вид:

$$F_n^b + \sum_n^{i=2} F_k^b \geq \left( F_n^a + \sum_n^{i=2} F_k^a + P_k + \sum_n^{i=2} P_6 \right) \mu + P_m, \quad (1)$$

где  $P_k$ ,  $P_6$  – соответственно результирующие силы прижатия деформированной КСМ и полуволн буровых труб, работающих в режиме вращения  $\Phi_1$ , к стенке скважины за счет действия осевой нагрузки и силы упругости изогнутого участка колонны, даН;  $P_m$  – сила, деформирующая компоновку и стремящаяся вызвать вращение вида  $\Phi_2$ , определяемая соотношением изгибающего момента со стороны забоя скважины  $M_{от}$  и упруго-реактивного момента  $M_p$ , даН;  $\mu$  – коэффициент трения-скольжения компоновки и колонны о стенку скважины.

При решении уравнения (1) форма изгиба участков колонны (длина полуволны  $l$ ) в пределах радиального зазора  $f$  принимается синусоидальной, которую можно описать уравнением

$$y = f \sin \frac{\pi x}{l}.$$

Силы  $P_k$  и  $P_6$  определяются через работу этих сил  $A_p$  по деформированию компоновки и буровых труб на величину прогиба в пределах радиального зазора:

$$A_p = 0,5 P_{oc} \int_0^l \left( \frac{dx}{dy} \right)^2 dx = 2,46 \frac{P_{oc} f^2}{l}.$$

В результате имеем следующие зависимости для расчета сил  $P_k$  и  $P_6$ :

$$P_k = 2,46 \frac{P_{oc} f_k}{l_k}; \quad P_6 = 2,46 \frac{P_{oc} f_6}{l_6}.$$

Составляющие сил  $P_k$  и  $P_6$ , действующие на стенку скважины, определяются, соответственно, через углы  $\alpha_i$  и  $\alpha_c$ :

$$P_{\kappa}^n = P_{\kappa} \cos \alpha_c; P_6^n = P_{\kappa} \cos \alpha_i.$$

Усилие прижатия  $P_m$ , вызванное опрокидывающим моментом со стороны забоя скважины, определим через уравнение работы момента сил  $M$  при деформировании компоновки с длиной полуволны  $l$ :

$$A_m = 0,5 \int_0^l \frac{M^2}{EJ} dx = \frac{M^2 l}{2EJ};$$

$$P_m = \frac{[M_p^2 \pm (M_{оп}^2)] J_{\kappa}}{2EJ f_{\kappa}},$$

где  $M_p$ ,  $M_{оп}$  – реактивный и опрокидывающий моменты, действующие на буровую компоновку со стороны забоя скважины при бурении анизотропной горной породы, даН·м;  $EJ$  – жесткость буровой компоновки, даН·м<sup>2</sup>.

Решение уравнения (1) относительно « $e$ » позволило получить выражение для расчета значения эксцентриситета центра масс буровой компоновки в случае её размещения непосредственно над породоразрушающим инструментом:

$$e \geq \frac{1}{q_{\kappa} (\sin \alpha_c - \cos \alpha_c \mu)} \times$$

$$\left\{ \frac{q_6 f_6 l_6}{l_{\kappa}} \sum_n^{i=1} (\cos \alpha_i \mu - \sin \alpha_i) + \right.$$

$$\left. \times \left[ \frac{4,9 P_{ос} \mu g}{l_{\kappa} \omega^2} \left( \frac{f_{\kappa}}{l_{\kappa}} \cos \alpha_c + \frac{f_6}{l_6} \sum_n^{i=1} \cos \alpha_i \right) + \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{(M_{оп}^2 \pm M_p^2) g}{E_{\kappa} J_{\kappa} f_{\kappa} \omega^2} \right] \right\} - f_{\kappa}. \quad (2)$$

Зависимость (2) позволяет получить достаточно полную качественную и количественную характеристику влияния суммы всех основных параметров компоновки буровой колонны, режимов бурения и других факторов на величину достаточного для реализации вида движения  $\Phi_1$  эксцентриситета центра масс КСМ, а также числа полуволн и, соответственно, длины участка колонны вовлеченного в этот вид движения ведущей их компоновкой. Анализ формулы (2) позволяет ответить на вопросы о влиянии ряда основных факторов на величину эксцентриситета, угол поворота компоновки и другие параметры. В формуле (2), в случае, если бурится изотропная горная порода,  $M_{оп}=0$ , а если при этом буровая компоновка над породоразрушающим инструментом сохраняет прямолинейность, то и  $M_p=0$ .

На рис. 3 приведены зависимости величины эксцентриситета, рассчитанные по формуле (2), от частоты вращения колонны и коэффициента трения колонны о стенку скважин, при  $M_{оп}=2$  даН·м,  $f_{\kappa}=0,5$  мм, компоновки массой 50 кг, длиной 5 м и при бурении колонной ЛБТН-54.

Графики показывают зависимость эксцентриситета от коэффициента трения колонны о стенку скважины и частоты вращения. Рост  $M_{оп}$  приводит

к повышению величины достаточного для эффективной работы компоновки в режиме  $\Phi_1$  эксцентриситета, а его значения вполне реальны с точки зрения реализации при изготовлении буровых компоновок.

Соответственно, стабильность движения вида  $\Phi_1$  повышается с ростом эксцентриситета центра масс, веса отдельной КСМ и числа КСМ, распределенных вдоль сжатого участка буровой колонны с некоторым шагом.

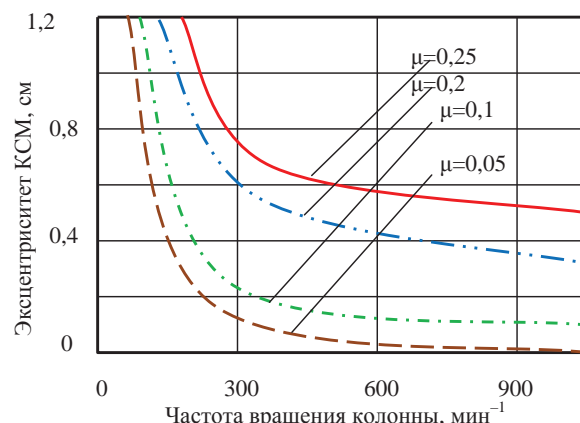


Рис. 3. Расчетные графические зависимости эксцентриситета буровой компоновки от частоты вращения колонны, коэффициента трения колонны о стенку скважины и величины опрокидывающего момента  $M_{оп}$ .

Fig. 3. Calculated graphic dependences of the boring configuration eccentricity on the column rotation frequency, coefficient of column friction on the well wall and the size of the overturning moment  $M_{оп}$ .

Влияние анизотропии горных пород на работу компоновки и вид ее движения велико и существенная доля центробежной силы, задаваемой эксцентриситетом поперечного сечения компоновки, направлена на преодоление фиксирующего действия опрокидывающего момента. Очевидно для надежной работы труб с эксцентриситетом центра масс в режиме  $\Phi_1$  в колонне на удалении от забоя величина эксцентриситета может быть меньше полученных значений (графики на рис. 3), так как в этом случае последнее слагаемое в скобках формулы (2) не должно учитываться. Так, например, при частоте вращения 10–15 с<sup>-1</sup> и  $\mu=0,2$  будет достаточным для реализации вращения вида  $\Phi_1$  эксцентриситет, равный 3–4 мм.

Анализ уравнения (2) и расчетных зависимостей эксцентриситета поперечного сечения буровой компоновки позволяет выделить два основных направления совершенствования колонн с КСМ:

1. Трубы со смещенным центром масс используются в нижней части стандартной статически сбалансированной буровой колонны в качестве буровых наборов для бурения с отбором керна (возможен вариант, реализованный нами в ПГО «Сосновгеология» [13,18] – колонковая труба и установленная над ней толстостенная

КСМ) или компоновки для бескернового бурения. Схема такой компоновки дана на рис. 2, а.

2. Трубы со смещенным центром масс устанавливаются по всей длине сжатой зоны бурильной колонны с определенным шагом  $L$ , причем последний обеспечивает всему сжатому участку колонны режим вращения  $\Phi_1$  и возрастает от забоя к нулевому сечению по мере уменьшения степени деформированности и роста длины полуволны изгиба. Схема такой компоновки дана на рис. 2, б.

Анализ зависимости (2) показывает, что наиболее активно влияет на достаточную величину эксцентриситета, гарантирующую стабильный вид вращения колонны в режиме  $\Phi_1$ , величина коэффициента внешнего трения колонны о стенку скважины. Учитывая это обстоятельство, для активного снижения коэффициента трения между КСМ и стенкой скважины нами разработана конструкция КСМ с опорами качения, что позволяет снизить коэффициент трения в несколько раз [22].

**Опытные работы по испытанию компоновок КСМ** выполнены в производственных условиях и заключались в изучении износа поверхности КСМ, отработанных при испытании в ГРЭ-324 ПГО «Сосновгеология» [13, 18].

При поиске оптимальной конструкции КСМ проводились испытания макетов компоновок, которые отличались величиной эксцентриситета центра масс. Макет КСМ изготавливался из колонковых труб диаметром 57 и 44 мм. Груз массой 9,5 кг (свинец) размещался вдоль компоновки на боковой поверхности внутренней трубы, которая центрировалась в наружной трубе кольцами. Длина компоновки – 4,0 м, вес – 40 даН. Величина эксцентриситета составила 8 мм (КСМ-8). Компоновка использовалась без центраторов, зазор  $f_k=1-2$  мм.

Испытания проводились на плановой скважине при бескерновом бурении.

Горные породы в интервале испытаний – анизотропные трахидациты, дациты, антрезито-базальты VIII–IX категорий по буримости, подверженные аргиллитизации, карбонатизации и гематизации. Показатель анизотропности по модулю упругости составляет значение от 1,2 до 1,7.

Результаты бурения компоновкой КСМ-8 сопоставлялись с результатами бурения жестким трехгранным стабилизатором ЗК длиной 6 м [13, 18].

Как следует из полученных данных, в сравнении с компоновкой ЗК, снижение интенсивности искривления скважин при бурении компоновками КСМ составило 1,4–1,5 раза, но при этом отмечено повышение механической скорости бурения на 10 % и рост стойкости долот до 30 %.

При анализе работоспособности макета КСМ-8 произведена обработка данных по лентам записи затрат мощности стандартным киловаттметром типа Н-348. Обработка показала существенное снижение уровня затрат мощности и колебательных процессов колонны в скважине при бурении КСМ.

Макет КСМ-1,6 испытан на скважине 6749 ГРЭ-324 ПГО «Сосновгеология» и показал очень высокие результаты. Интенсивность искривления составила  $0,95^\circ$  на 100 м на интервале бурения 110 м (базальт IX–X категории по буримости). При алмазном бурении нижезалегающих пород интенсивность искривления составила  $2,9^\circ$  на 100 м, а при бурении скважины 6747 (параллельный профиль на расстоянии 100 м) алмазным колонковым способом в том же интервале, в котором работала КСМ-1,6 в скважине 6649 –  $4,7^\circ$  на 100 м.

Аналогичная компоновка испытана в ГРЭ-324 ПГО «Сосновгеология». Здесь за базу сравнения принята компоновка, изготовленная из колонковой трубы диаметром 57 мм без центраторов с долотом ДДА-59. Данной компоновкой пробурен интервал 58,4–223 м (фельзиты, дациты) и получена интенсивность искривления  $0,43^\circ$  на 10 м. Макетом КСМ-1,6 с долотом ДДА-59 пробурен последующий интервал 223–330 м и получена интенсивность искривления  $0,075^\circ$  на 10 м. При бурении использовались равные параметры режима:  $P_{oc}=20$  кН,  $\omega=510$  мин<sup>-1</sup>.

Анализ экспериментальных материалов показал, что колонны с КСМ работают в скважине с минимальной вибрацией, что и обеспечивает более эффективное бурение. Так, например, для описанного выше случая отмечено снижение интенсивности естественного искривления в 5,7 раза, повышение механической скорости бурения на 14–28 %, увеличение стойкости долот на 41 %. Ресурс самих компоновок возрос в 2,7 раза, а стоимость станко-смены снизилась на 5 %.

Для случая, когда КСМ располагается между бурильными трубами и выполняет роль маховика, организующего вращение деформированной бурильной колонны, величина эксцентриситета может определяться по следующей формуле:

$$e \geq \frac{1}{q_k (\sin \alpha_c - \cos \alpha_c \mu)} \times \left\{ \frac{q_6 f_6 l_6}{l_e} \sum_n^{i=1} (\cos \alpha_i \mu - \sin \alpha_i) + \frac{4,9 P_{oc} \mu g}{l_k \omega^2} \left( \frac{f_k}{l_k} \cos \alpha_c + \frac{f_6}{l_6} \sum_n^{i=1} \cos \alpha_i \right) \right\} - f_k.$$

Минимально допустимые значения эксцентриситета  $e$  для реализации компоновкой КСМ вида вращения  $\Phi_1$  для разных типоразмеров труб при рекомендуемых параметрах нагрузки представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Для обеспечения стабильного вида  $\Phi_1$  при минимальном эксцентриситете центра масс требуется соблюдение следующих условий:

- высокие частоты вращения бурильных колонн;
- минимальная деформированность колонны, что предполагает использование технологий и инструментов, позволяющих эффективно бу-



речь при минимальных  $P_{oc}$ , а также использование систем «колонна–скважина» с минимальными радиальными зазорами;

- минимальное значение коэффициента трения между компоновкой, колонной и стенкой скважины;
- снижение изгибающих моментов, действующих на торец бурового инструмента и компоновку при бурении анизотропных горных пород со стороны забоя скважины.

**Таблица 1.** Минимальные необходимые значения эксцентриситета для реализации вращения компоновки по типу  $\Phi_1$  в зависимости от частоты вращения при рекомендуемой осевой нагрузке

**Table 1.** Minimum required values of the eccentricity for implementation of the configuration rotation in terms of  $\Phi_1$  depending on rotation frequency at the recommended axial loading

Частота вращения, мин <sup>-1</sup> Rotation frequency, min <sup>-1</sup>	Значения эксцентриситета e для размеров труб, мм Values of eccentricity e for the sizes of pipes, mm			
	BQ	NQ	HQ	PQ
400	1,61	1,67	1,51	1,72
600	1,46	1,43	1,30	1,51
800	1,30	1,11	1,12	1,31
1000	1,21	1,0	0,96	1,16

В соответствии с указанными требованиями максимально подходят для эффективного применения КСМ бурильные колонны ССЖ, используемые при алмазном высокочастотном бурении.

Анализ полученных формул позволяет установить природу сдвига фаз  $\alpha_c$  между векторами центро-

бежной силы при реализации колонной вращения вида  $\Phi_1$ . Из данных зависимостей следует, что при условии  $F_{\kappa}^b = F_{\kappa}^n$  коэффициент внешнего трения  $\mu = \text{tg} \alpha_c$ , что указывает на то, что сдвиг фаз является результатом действия силы трения, так как полученный тангенс угла  $\alpha_c$  и есть классическая интерпретация коэффициента трения, а угол  $\alpha_c$  таким образом, есть угол трения системы «колонна–скважина».

С целью определения длин участков колонны, вовлеченных в режим обращения (режим, близкий к  $\Phi_1$ ), составим новое энергетическое уравнение сил и моментов сил:

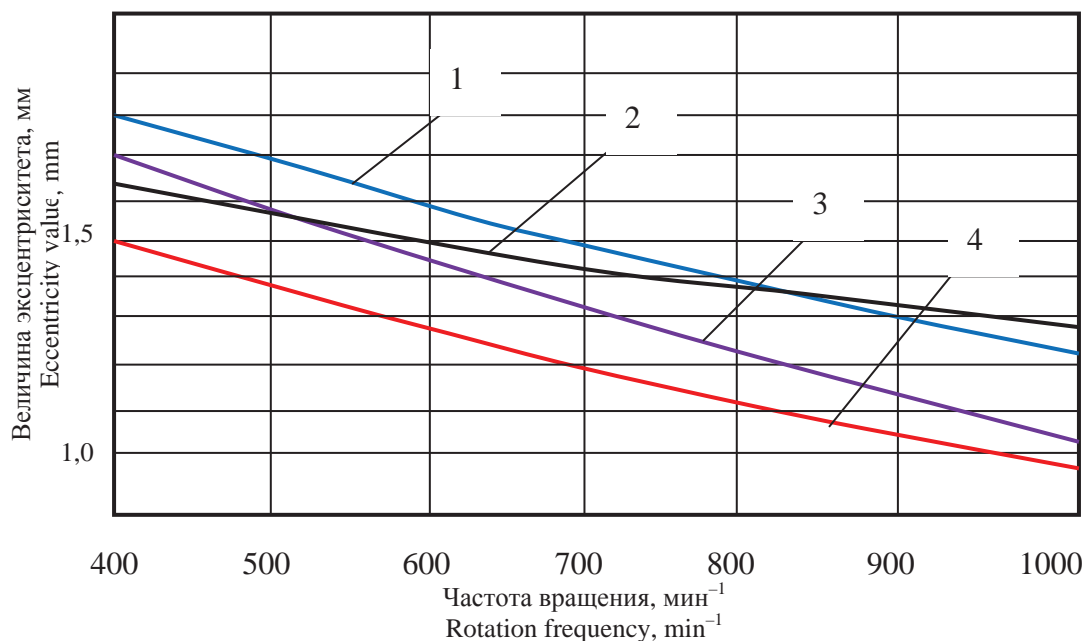
$$F_{\kappa}^b + \sum_n^{i=1} F_{\kappa n}^b + \sum_n^{i=1} F_{\kappa n}^n = \left( F_{\kappa}^n + \sum_n^{i=1} F_{\kappa n}^n + \sum_n^{i=1} F_{\kappa n}^b + P_{\kappa} + \sum_n^{i=1} P_{\phi} \right) \mu,$$

где  $F_{\kappa n}^b$ ,  $F_{\kappa n}^n$ ,  $F_{\kappa n}^b$ ,  $F_{\kappa n}^n$  – составляющие центробежной силы, действующей на нижний (расположенный под КСМ) и верхний (расположенный над КСМ) участки бурильной колонны, соответственно, силы возмущающая и прижатия, даН.

В данной формуле есть смысл объединить работы сил  $F_{\kappa n}^b$  и  $F_{\kappa n}^n$  с учетом числа полуволн  $N$ , вовлеченных в режим вращения  $\Phi_1$ . В этом случае уравнение будет выглядеть иначе:

$$F_{\kappa}^b + \sum_{2n}^{i=1} F_{\phi}^b = \left( F_{\kappa}^n + \sum_{2n}^{i=1} F_{\phi}^n + P_{\kappa} + \sum_n^{i=2} P_{\phi} \right) \mu,$$

где  $F_{\phi}^b$ ,  $F_{\phi}^n$  – составляющие центробежной силы, действующей на нижний и верхний участки бурильной колонны, соответственно, силы возмущающая и прижатия, даН.



**Рис. 4.** График зависимости эксцентриситета от частоты вращения колонны: 1 – PQ; 2 – BQ; 3 – NQ; 4 – HQ

**Fig. 4.** Schedule of eccentricity dependence on a column rotation frequency: 1 – PQ; 2 – BQ; 3 – NQ; 4 – HQ

С учетом входящих в данную зависимость выражений путем преобразования можно получить квадратное уравнение следующего вида:

$$AL_6^2 + BL_6 - L_6 = 0.$$

Решение данного уравнения позволяет рассчитать длину вовлекаемого в режим  $\Phi_1$  участка буровой колонны  $L_6=2L$  (рис. 2, б):

$$L_6 = \frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A},$$

где

$$A = \frac{f_6 q_6 \omega^2}{2g} (\sin \alpha_{тс} - \cos \alpha_{тс} \mu);$$

$$B = \frac{(e + f_к) q_к \omega^2 l_к}{2g} (\sin \alpha_{кс} - \tilde{n} \alpha_{кс} \mu) - 2,46 P_{oc} \frac{f_к}{l_к} \cos \alpha_{тс} \mu;$$

$$C = 2,46 P_{oc} f_6 \cos \alpha_{тс} \mu,$$

где  $f_6$  – прогиб буровых труб, м;  $q_6$  – масса одного метра трубы, кг;  $\omega$  – частота вращения;  $e$  – величина эксцентриситета, м;  $l_6$  – длина полуволны буровой трубы, м;  $l_к$  – длина КСМ, м;  $\alpha_{кс}$ ,  $\alpha_{тс}$  – углы проворота трубы КСМ и буровых труб под действием сил трения, град;  $\mu$  – коэффициент трения-скольжения между элементами буровой колонны и стенками скважины.

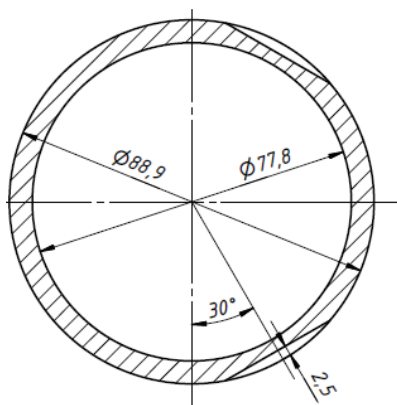


Рис. 5. Опытный образец трубы КСМ типоразмера НQ

Fig. 5. Prototype of the HQ standard size KSM pipe

Угол проворота участка буровой колонны  $\alpha_{тс}$  меняется от максимального значения, равного углу проворота КСМ  $\alpha_{кс}$ , до нуля, поэтому при расчетах величина этого угла будет равна половине угла  $\alpha_{кс}$ .

В табл. 2 приведены расчетные данные зависимости длины вовлекаемого участка буровой колонны в режим вращения  $\Phi_1$  от частоты вращения колонны при заданном угле проворота КСМ и минимально допустимом эксцентриситете при коэффициенте трения  $\mu=0,2$ .

Исходя из данных расчетов, определены длины вовлекаемых участков колонны в режим движения

$\Phi_1$  в зависимости от типоразмера труб и при различной частоте вращения снаряда. При этом для каждого значения частоты вращения колонны в расчетах использованы соответствующие углы проворота компоновки (определены экспериментально по схемам износа буровых компоновок) КСМ  $\alpha_{кс}$ .

Таблица 2. Расчетные данные длины вовлекаемого в вид движения  $\Phi_1$  участка буровой колонны

Table 2. Design values of the length of a boring column site involved in the movement  $\Phi_1$

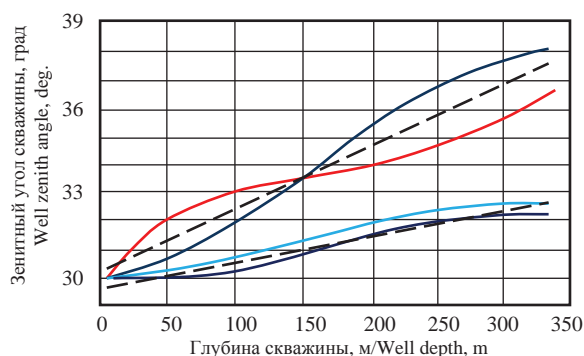
Частота вращения, мин <sup>-1</sup> Rotation frequency, min <sup>-1</sup>	Типоразмер буровой колонны Standard size of a boring column			
	BQ	NQ	HQ	PQ
	Параметр L, м/Parameter L, m			
1000 $\alpha_{кс}=70^\circ$	8,11	7,46	7,22	7,25
800 $\alpha_{кс}=65^\circ$	8,50	7,82	7,60	7,60
600 $\alpha_{кс}=55^\circ$	9,91	9,28	8,81	8,80
400 $\alpha_{кс}=45^\circ$	11,59	10,93	10,29	10,25

Опытные образцы буровых труб КСМ для бурения ССК изготавливались из стандартных труб НQ. Смещение центра тяжести поперечного сечения обеспечивалось удалением двух лысок вдоль корпуса трубы, расположенных своими осями относительно друг друга под углом в  $120^\circ$  с образованием плоских продольных участков наружной поверхности трубы (рис. 5). Глубина снимаемых лысок составила 2,5 мм. Лыски выполнялись с отступом от резьб на расстояние 125 мм. В центре трубы на интервале 250 мм лыски не фрезеровались с целью максимального сохранения устойчивости КСМ при бурении. Смещение центра тяжести поперечного сечения в данном случае составило 1,66 мм.

Производственные испытания, проведенные летом 2015 г., трех опытных образцов КСМ, установленных в нижней части буровой колонны (первая над колонковым набором, вторая через две трубы, т. е. на расстоянии 6 м от первой КСМ, третья КСМ установлена через 9 м, т. е. через три буровые трубы от второй КСМ), показали рост механической скорости бурения на 10–20 %, уменьшение затрат мощности на вращение на 10 %, значительное снижение уровня вибрации буровой колонны, а также снижение естественного искривления скважины. Величина естественного искривления по зенитному углу при использовании КСМ в составе сжатой части буровой колонны снизилась в 2,9 раза.

На рис. 6 представлены кривые, отражающие изменение зенитного угла на интервалах бурения протяженностью примерно по 300 м на четырех плановых скважинах Попутнинского месторождения.

По азимутальному углу значительных искривлений не наблюдалось, тем не менее азимутальное направление скважин оказалось более выдержанным при бурении снарядом с КСМ (снижение интенсивности искривления наблюдалось в 1,15 раза).



**Рис. 6.** Результаты инклинометрии по зенитному углу на типовых скважинах Попутнинского месторождения (расстояние между профилями скважин 50 м): 1, 2 – бурение стандартным снарядом HQ; 3, 4 – бурение снарядом HQ с тремя КСМ; 4, 5 – средние значения зенитного угла по двум скважинам

**Fig. 6.** Results of directional survey on a zenith angle on standard wells of the Poputninskoye field (distance between profiles of wells is 50 m): 1, 2 – drilling with a standard shell HQ; 3, 4 – drilling with HQ shell with three configurations with the displaced cross section mass center; 4, 5 – average values of a zenith angle on two wells

Таким образом, компоновки КСМ показали свою высокую эффективность как технического средства, улучшающего условия работы буровой колонны посредством изменения характера ее вращения.

Подтверждена возможность изготовления компоновок КСМ с достаточным эксцентриситетом центра масс для основных типоразмеров колонн, используемых при геолого-разведочных работах при бурении скважин с применением комплексов ССК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonnar R., Panagapko O.A., Williams G.I. Deep deflection coreholing // *Engineer and Mining J.* – 1985. – № 8. – P. 26–30.
2. Holbert D.R. New interest in drainhole drilling revives technology // *World oil.* – 1981. – № 4. – P. 7–10.
3. Williams G.I. Operation experience with wireline technique // *Geodrilling.* – June, 1986. – № 7. – P. 7–10.
4. Bredley W.B. Formation characteristics have a key effect on hole direction // *Oil and gas J.* – 1975. – V. 73. – № 31. – P. 77–80.
5. Steueung horizontaler Kernbohrungen grosser lange im Salzgestein / G. Boning, H. Ieziarski, W. Pitz, M. Sohlocbaoch // *Erzmetall.* – 1984. – № 5. – P. 8–11.
6. Holbert D.R. How rotary speed affect bits trajectory // *Drilling Contractor.* – July, 1986. – № 7. – P. 92–94.
7. Riley L., Swarts H., Anderson M. Large diameter bi-center bits and drilling casts // *Petroleum Engineer International.* – 1990, August. – № 8. – P. 25–30.
8. Нескоромных В.В. Результаты экспериментальных исследований буримости анизотропной горной породы // *Известия вузов «Геология и разведка».* – 2013. – № 6. – С. 79–84.
9. Нескоромных В.В. Анализ процесса разрушения анизотропной горной породы шарошечными долотами // *Инженер-нефтяник.* – 2014. – № 3. – С. 5–11.
10. Лесин В.С., Рычков Е.И. Исследование трения в анизотропных горных породах // *Сб. конференции «Проблемы геологии и освоения недр».* – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 346–347.
11. Повышение эффективности колонкового алмазного бурения / Б.И. Воздвиженский, Г.А. Воробьев, Л.К. Горшков и др. – М.: Недра, 1990. – 208 с.
12. Современные методы и технологии по управлению траекториями геологоразведочных скважин / Ю.С. Костин, Ю.Г. Соловов, Р.Б. Закиев и др. – Чита: ООО «Издательский дом "Ресурсы Забайкалья"», 2004. – 352 с.
13. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии. – М.: Инфра-М, 2016. – 336 с.
14. Нескоромных В.В. Оптимизация в геолого-разведочном производстве. – М.: Инфра-М, 2015. – 199 с.
15. Уржумов А.И. Снижение интенсивности искривления скважин при бурении ССК-59 // *Разведка и охрана недр.* – 1982. – № 8. – С. 28–31.
16. Буглов Н.А. Оптимизация параметров колонковых снарядов для алмазного бурения направленных геолого-разведочных скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1988. – 22 с.
17. Компоновка низа бурильной колонны / Б.А. Новожилов, Г.П. Новиков, Г.А. Воробьев и др.: авторское свидетельство СССР № 1680939; заявл. 10.10.89; опубл. 30.09.91, Бюл. № 36. – 3 с.
18. Страбыкин И.Н., Нескоромных В.В. Колонна бурильных труб для высокочастотного бурения: авторское свидетельство СССР № 1406332; заявл. 18.04.85; опубл. 30.06.88, Бюл. № 24. – 3 с.
19. Kernrohre fur richtungsstabiles Bohren. Patent DDR, no. 260629 A3, 1988.

Методика определения достаточной величины эксцентриситета для реализации вращения КСМ по типу  $\Phi_1$ , шага установки КСМ в составе бурильной колонны позволяют, исходя из конкретных технико-технологических параметров, определить нужную конструкцию и места установки компонентов КСМ.

#### Выводы

1. На основе разработанной модели движения буровых компоновок со смещенным центром тяжести поперечного сечения получены аналитические зависимости для расчета величины эксцентриситета компоновки, обеспечивающие ее вращение в режиме  $\Phi_1$ , а также длину вовлекаемого в режим вращения  $\Phi_1$  участка колонны, что позволяет создавать компоновки бурильной колонны, способные работать в более благоприятном режиме и обеспечивать повышение эффективности бурового процесса.
2. На основе стандартных бурильных труб для ССК типоразмера HQ разработаны и изготовлены трубы со смещенным центром тяжести, которые испытаны на производственных скважинах в составе компоновки, в которой размещено три трубы КСМ. Результаты испытаний показали, что в составе высокосбалансированных бурильных колонн ССК эффективно применение труб со смещенным центром тяжести: достигается снижение интенсивности естественного искривления скважин, вибрации и затрат мощности на работу бурильной колонны.

20. Нескоромных В.В., Страбыкин И.Н. Анализ работы несбалансированной компоновки бурового снаряда // Известия вузов «Геология и разведка». – 1988. – № 10. – С. 79–84.
21. Бобылев Ф.А. К вопросу изучения работы неуравновешенной компоновки бурового снаряда на математической модели // Технический прогресс в разведочном бурении. – Алма-Ата: КазИМС, 1980. – С. 34–37.
22. Компоновка бурильной колонны: пат. РФ № 2078194; заявл. 21.07.93; опубл. 27.04.97, бюл. № 12. – 5 с.

*Поступила 11.04.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

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

**Петенёв П.Г.**, старший преподаватель кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

UDC 622.243

## RESULTS OF THEORETICAL AND SKILLED WORKS ON STUDYING THE MECHANISM OF OPERATION OF BORING CONFIGURATIONS WITH A DISPLACED CROSS SECTION MASS CENTER

Vyacheslav V. Neskoromnykh<sup>1</sup>,

E-mail: sovair@bk.ru

Pavel G. Petenev<sup>1</sup>,

E-mail: pavel-whait@mail.ru

<sup>1</sup> Siberian Federal University,

95, «Krasnoyarskiy rabochy» newspaper Avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

**Relevance** of the research is explained the necessity to increase the efficiency of drilling prospecting wells in difficult mining-and-geological conditions, including those related to a natural curvature of wells.

**The aim** of the research is to develop a technique of using and designs of boring configurations with the displaced cross section mass center which allow increasing the efficiency of drilling the prospecting wells.

**Research methods:** analytical researches, developmental works and experimental skilled works.

**Results.** The authors have developed the theoretical regulations, a technique of application and a design of boring configurations with the displaced cross section mass center and carried out the production tests of various designs of boring configurations with the displaced cross section mass center when drilling.

**Conclusions.** Based on the developed model of movement of boring configurations with the displaced center of gravity of cross section the authors obtained the analytical dependences for calculating the sizes of eccentricity of boring configuration cross section providing their rotation round a well axis ( $\Phi_1$  type), as well as the length of the column part involved in the rotation mode  $\Phi_1$  that allows developing the configurations of a boring column capable of operating in more favorable mode and providing the increase of boring efficiency. Based on standard shells with the removable core receiver of a standard HQ size the pipes with the displaced cross section mass center were developed and produced. They were tested on production wells as a part of configuration in which three pipes with the displaced cross section mass center were placed. The results of the tests showed that it is efficient to apply the pipes with the displaced cross section mass center as a part of the high-balanced boring columns as the decrease in intensity of natural curvature of wells is reached, vibration and costs of power for boring column operation decrease.

### Key words:

well, drilling, boring column, configuration, well curvature.

### REFERENCES

- Bonnar R., Panagapko O.A., Williams G.I. Deep deflection co-reholing. *Engineer and Mining J.*, 1985, no. 8, pp. 26–30.
- Holbert D.R. New interest in drainhole drilling revives technology. *World oil*, 1981, no. 4, pp. 7–10.
- Williams G.I. Operation experience with wireline technique. *Geo-drilling*, June, 1986, no. 7, pp. 7–10.
- Bredley W.B. Formation characteristics have a key effect on hole direction. *Oil and gas J.*, 1975, vol. 73, no. 31, pp. 77–80.
- Boning G., Ieziarski H., Pitz W., Sohlochbaoch M. Steueung horizontaler Kernbohrungen grosser lange im Salzgestein. *Erzmetal*, 1984, no. 5, pp. 8–11.
- Holbert D.R. How rotary speed affect bits trajectory. *Drilling Contractor*, July, 1986, no. 7, pp. 92–94.
- Riley L., Swarts H., Anderson M. Large diameter bi-center bits and drilling casts. *Petroleum Engineer International*, 1990, August, no. 8, pp. 25–30.
- Neskoromnykh V.V. Results of pilot studies of drilling capacity of anisotropic rock. *Izvestiya vuzov. Geologiyairazvedka*, 2013, no. 6, pp. 79–84. In Rus.
- Neskoromnykh V.V. Analysis of anisotropic rock destruction with roller bits. *Inzhener-neftyanik*, 2014, no. 3, pp. 5–11. In Rus.
- Lesin V.S., Ritschkov E.I. Issledovanie treniya v anizotropnoy gornoy porode [Research of friction in anisotropic rocks]. *Sb. Konferentsii. Problemy geologii i osvoeniya neдр* [Proc. of the conference. Problems of geology and subsoil exploration]. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. pp. 346–347.
- Vozdvizhensky B.I., Vorobev G.A., Gorshkov L.K. *Povyschenie effektivnosti kolonkovogo almaznogo bureniya* [Increase of efficiency of diamond core drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 208 p.
- Kostin Yu.S., Solovov Yu.G., Zakiev R.B. *Sovremennyye metody i tekhnologii po upravleniyu traektoriyami geologorazvedochnykh skvazhin* [Modern methods and technologies on management of trajectories of prospecting wells]. Chita, Resursy Zabaykaliya Publ. house, 2004. 352 p.
- Neskoromnykh V.V. *Napravlennoe burenie i osnovy kernometrii* [Directed drilling and bases of core orient]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 336 p.
- Neskoromnykh V.V. *Optimizatsiya v geologorazvedotchnom proizvodstve* [Optimization in prospecting production]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 199 p.
- Urzhumov A.I. Snizhenie intensivnosti iskrivleniya skvazhin pri burenii SSK-59 [Decrease in intensity of wells curvature when drilling SSK-59]. *Razvedka i okhrana neдр*, 1982, no. 8, pp. 28–31.
- Buglov N.A. *Optimizatsiya parametrov kolonkovykh snaryadov dlya almaznogo bureniya napravlennykh skvazhin. Autoreferat Dis. Kand. nauk* [Optimization of parameters the core equipment for core drilling of the directed wells. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 1988. 22 p.
- Novozhilov B.A., Novikov G.P., Vorobev G.A. *Komponovka niza burilnoy kolonny* [Configuration of a bottom of a boring column]. Author certificate, USSR, no. 1680939, 1991.
- Strabikin I.N., Neskoromnykh V.V. *Kolonna burilnykh trub dlya vysokot chastotnogo bureniya* [Column of boring pipes for high-frequency drilling]. Author certificate, USSR, no. 1406332, 1988.

19. *Kernrohre für richtungsstabiles Bohren*. Patent DDR, no. 260629 A3, 1988.
20. Neskoromnykh V.V., Strabikin I.N. Analiz raboty nesbalansirovannoy komponovki burovogo snaryada [Analysis of operation of unbalanced configuration of a boring shell]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1988, no. 10, pp. 79–84.
21. Bobilev F.A. K voprosu izutcheniya raboty neuravnoveshennoy komponovki burovogo snaryada na matematicheskoy modeli [On the issue of studying the operation of unbalanced configuration of a boring shell on a mathematical model]. *Tekhnicheskyy progress v razvedochnom burenii* [Technical advance in exploration drilling]. Alma-Ata, KazIMS Publ., 1980. pp. 34–37.
22. Neskoromnykh V.V. *Komponovka burilnoy kolonny* [Configuration of a boring column]. Patent RF, no. 2078194, 1997.

*Received: 11 April 2016.*

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

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

**Pavel G. Petenev**, senior teacher, Siberian Federal University.

УДК 551.8:556.5

## МЕТОДИКА РЕКОНСТРУКЦИИ ЗОНАЛЬНОГО ВОДНОГО СТОКА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ

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

Решетько Маргарита Викторовна<sup>1</sup>,  
MRechetko@tpu.ru

Моисеева Юлия Александровна<sup>1</sup>,  
julchiky@mail.ru

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

**Актуальность исследования** определяется необходимостью изучения палеогидрологических условий, играющих важную роль при формировании геохимических аномалий. Методика подобных исследований в настоящее время разработана недостаточно, что сказывается на обоснованности и эффективности поисков полезных ископаемых.

**Цель исследования:** разработка и обоснование методики палеогидрологических реконструкций с целью определения суммарного водного стока, обусловленного зональными климатическими условиями.

**Методы исследования:** географо-гидрологический и статистические методы, математическое моделирование гидрологических процессов.

**Результаты и выводы.** Разработана математическая модель формирования суммарного зонального водного стока. На её основе предложена и апробирована методика палеогидрологических реконструкций. С помощью модели выявлено несинхронное изменение зонального водного стока в северной и центральной частях Западной Сибири, обусловленное различными тенденциями изменений климатических и геоэкологических условий. Показано, что более резкие и разнонаправленные колебания водного стока в голоцене в большей степени характерны для северных районов, соответствующих в настоящее время подзоне северной тайги, зонам лесотундры и тундры. В подзоне южной и средней тайги изменения водного стока менее выражены и более тесно связаны с болотными процессами. Сделан вывод о том, что увеличение изменчивости водного стока в целом должно привести к определённому росту изменчивости содержания ряда растворённых веществ и, следовательно, вероятности формирования гидрогеохимических аномалий. В среднесрочной перспективе при продолжении потепления климата следует ожидать увеличение лесистости водосборов. При этом вероятен рост суммарного водного стока в районах с заболоченностью менее 40 %.

### Ключевые слова:

Палеогидрологические реконструкции, зональный водный сток, имитационно-статистическая модель водного стока, водный баланс, атмосферное увлажнение.

### Введение

Интенсивность водообмена регулирует время и условия взаимодействия в системе «вода – порода – органическое вещество – газ» [1, 2]. По этой причине понимание палеогидрологических условий играет важную роль в построении теории формирования геохимических аномалий и поисков гидрогенных месторождений полезных ископаемых, что определяет актуальность палеогидрологических реконструкций. Однако методика подобных исследований мало разработана и опирается в основном на методику воднобалансовых расчётов и инженерно-гидрометеорологических изысканий для строительства в современный период либо представляет собой второстепенное приложение к методике климатических реконструкций, которые, в свою очередь, базируются на целом ряде достаточно грубых предположений [3–5]. В настоящее время используются различные методы палеоклиматических реконструкций [6–12] для периода голоцена на территории всего земного шара. На исследуемой территории Западной Сибири ранее проводились палеоботанические реконструкции

[8], палинологические [9, 10], дендрохронологические [11], палеогляциологические [12] и др.

### Объекты, материалы и методы исследования

С учётом этого авторами предпринята попытка сформировать алгоритм палеогидрологических реконструкций с целью определения суммарного водного стока, обусловленного зональными климатическими условиями (далее «зональный годовой сток»). Разработка алгоритма проводилась на основе математической модели формирования годового водного стока, в свою очередь построенной на уравнении среднемноголетнего водного баланса для условно однородного периода. При этом, во-первых, использовалась концепция относительно резкого перехода гидрологической системы из одного состояния в другое. Во-вторых, для апробации модели и алгоритма использовались опубликованные среднемноголетние данные, полученные на территории бывшего СССР (прежде всего, в Сибири) за условно однородные периоды (либо за период 1930–1969 гг., либо за период 1970–2000-е гг.). Граница однородных периодов для данной терри-

тории является приближённой и принята с учётом выводов, приведённых в работах [13–15].

В качестве основных объектов исследования рассмотрены водосборы рек Чузик и Турухан. Река Чузик является элементом системы «Чузик – Парабель – Обь – Карское море» и расположена в пределах южнотаёжной подзоны в Обь-Иртышском междуречье в левобережной части бассейна реки Оби. Участок верхнего течения этой реки находится в границах одного из самых больших в мире болот – Васюганского. Общая площадь водосбора – 7090 км<sup>2</sup>, заболоченность – 35 %, лесистость – 64 % [16]. Река Турухан является левым притоком реки Енисей, также расположена в пределах Западно-Сибирской равнины, но уже на границе лесотундры и северной тайги. Площадь её водосбора – 10100 км<sup>2</sup>, лесистость – 37 %, заболоченность – менее 1 % [17]. Выбор указанных водотоков определялся задачами изучения палеогидрологических реконструкций на равнинной территории Западной Сибири.

#### Структура модели годового водного стока

Все модели стока в том или ином виде получены из уравнений сохранения массы и энергии. В данном случае использовано уравнение годового водного баланса водосбора без перетоков из смежных территорий [18]:

$$Y_i = H_i - E_i \pm \Delta Z_i, \quad (1)$$

где  $Y_i$  – слой водного стока, мм/период;  $H_i$  – слой общего увлажнения, складывающегося из жидких атмосферных осадков  $X_{ji}$ , водоотдачи из снежного покрова  $h_{si}$  и ледовых образований  $h_{li}$  ( $H_i = X_{ji} + h_{si} + h_{li}$ , мм/период);  $E_i$  – суммарное испарение с поверхности водосбора, мм/период;  $\Delta Z_i$  – изменение влагозапасов в водосборе, мм/период; нижний индекс  $i$  в рассматриваемой работе соответствует году ( $y$ ) или месяцу ( $m$ ).

Для расчёта испарения, при отсутствии данных непосредственных наблюдений на воднобалансовых площадках, в российской литературе чаще всего рекомендуются метод М.И. Будыко и метод гидроклиматических расчётов [19–21], а в зарубежной – метод Пенмана–Монтейта [22, 23]. Обоснованное использование указанных методов предполагает наличие данных измерений суммарной радиации, эффективного излучения подстилающей поверхности, потока тепла в почву, скорости ветра, температуры воздуха и влажности приземных слоёв атмосферного воздуха, температуры испаряющей поверхности, влажности почвогрунтов в верхнем метровом слое и ряд других характеристик. При решении палеогидрологических реконструкций таких данных объективно нет, а введение дополнительных допущений только увеличивает неопределённость расчётов. Для решения этого вопроса целесообразно вернуться к формуле Шрейбера [24], предложенной ещё в начале XX века. Её физический смысл становится очевидным, если предпо-

ложить, что суммарное испарение ( $E$ ) в последовательности испытаний Бернулли [23, 25], с учётом и общего увлажнения ( $H$ ), и максимально возможного в конкретных природных условиях испарения  $E_0$ , приближённо описывается уравнением

$$P(E \leq E_0) \approx 1 - \exp\left(-\frac{E_0}{H}\right), \quad (2)$$

где  $P(E \leq E_0)$  – вероятность того, что значение  $E$  меньше или равно  $E_0$ . Если принять  $P(E \leq E_0) \approx \frac{E}{H}$ , то, с учётом (1), (2), можно записать:

$$Y = H \exp\left(-\frac{E_0}{H}\right). \quad (3)$$

Величина  $E_0$ , с учётом уравнения теплового баланса, является функцией радиационного баланса и теплообмена между атмосферой и почвогрунтами, которые, в свою очередь, нелинейно связаны с положительными температурами воздуха (состояние поверхности наиболее активно меняется за счёт растительности, развитие которой в целом ограничено именно положительными температурами воздуха). С учётом этого для территории бывшего СССР, по данным [26, 27] о водном балансе 113 средних рек, для широт севернее 30° получена зависимость:

$$E_0 = k_{E,1}(\sum T_{>0})^2 - k_{E,2}(\sum T_{>0})^3,$$

где  $\sum T_{>0}$  – сумма положительных среднемесячных температур атмосферного воздуха, °C;  $k_{E,1}$  и  $k_{E,2}$  – эмпирические коэффициенты ( $k_{E,1} = 0,3080 \pm 0,0144$ ;  $k_{E,2} = 0,0021 \pm 0,0001$ ; квадрат корреляционного отношения  $R^2 = 0,42$ ). Соотношение расчётных (3) и измеренных значений годового водного стока приведено на рис. 1.

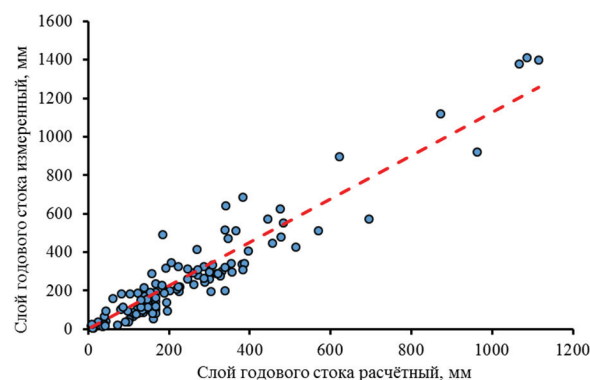


Рис. 1. Отношение измеренных и расчётных значений годового слоя водного стока средних рек на территории бывшего СССР,  $R^2 = 0,89$

Fig. 1. Ratio of the measured and calculated values of annual runoff depth of medium size rivers in the territory of the former USSR,  $R^2 = 0,89$

Транспирация и, следовательно, суммарное испарение и суммарный сток зависят от вида расти-



тельности [28–30]. Существенное влияние на суммарное испарение и сток, согласно [28, 31], оказывает и дренированность территории как фактор, совместно с испаряемостью определяющий выбор из двух вариантов: 1) стекает то, что не успело испариться; 2) испаряется то, что не успело стечь. Дренированность территории является, в свою очередь, функцией средней высоты водосбора. Регрессионный анализ материалов Водного кадастра СССР [26] позволил определить общий вид функции влияния на водный сток лесистости, заболоченности и средней высоты водосбора и более точно оценить связь водного стока, испаряемости и атмосферного увлажнения ( $R^2=0,97$ ):

$$Y = k_{Y,1} H \eta^{k_{Y,2}} (f_F + 1)^{k_{Y,3}} (f_M + 1)^{k_{Y,4}} \exp\left(-\frac{E_0}{H}\right) = \mu H \exp\left(-\frac{E_0}{H}\right), \quad (4)$$

$$\eta = \begin{cases} Z_b - 500, & Z_b > 500 \\ 1, & Z_b \leq 500 \end{cases}$$

где  $Z_b$  – средняя высота водосбора, м (учитывается в горах, плоскогорьях и нагорьях с учётом градаций высотных отметок по [32]);  $f_M$  – заболоченность водосбора, %;  $f_F$  – лесистость водосбора, %;  $\mu$  – функция влияния физико-географических условий на водный сток;  $k_{Y,1}$ ,  $k_{Y,2}$ ,  $k_{Y,3}$ ,  $k_{Y,4}$  – эмпирические коэффициенты (для изученных средних рек бывшего СССР методом наименьших квадратов получены следующие оценки значений коэффициентов:  $k_{Y,1}=0,343$  (от 0,274 до 0,429);  $k_{Y,2}=0,057 \pm 0,020$ ;  $k_{Y,3}=0,278 \pm 0,052$ ;  $k_{Y,4}=-0,108 \pm 0,034$ ).

Физический смысл зависимости (4), согласно [18, 23, 28, 29, 31, 33], заключается в том, что норма водного стока в целом возрастает: 1) с увеличением атмосферного увлажнения, средней высоты местности в горных районах (безусловно, в данном случае необходимо учитывать экспозицию склонов относительно преобладающего направления движения воздушных масс, но статистически значимая связь, тем не менее, присутствует: коэффициент корреляции между  $Z_b$  и отношением измеренных и расчётных значений годового слоя водного стока средних рек составляет  $0,41 \pm 0,11$ ); 2) с увеличением лесистости водосбора, которая, несмотря на увеличение транспирации на участках размещения древесной растительности, определяет более высокий (по сравнению с безлесными участками) влагозапас в речном бассейне, участвующий во влагообороте в дренируемой зоне, и относительно равномерное поступление воды в речную сеть; 3) с уменьшением заболоченности водосбора, сопряжённой со слабой дренированностью территории и с «приоритетным» расходом влаги на насыщение торфяной залежи, пополнение внутриболотных водоёмов, испарение и только потом – на сток.

Используя разложение в ряд Тейлора [34], получим аппроксимации математического ожидания  $Y_a$  и стандартного отклонения  $\sigma_Y$  слоя стока:

$$Y_a \approx \mu H_a \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \times \left(1 + \frac{\sigma_H^2}{\mu H_a} \frac{d\mu}{dH} \left(1 + \frac{E_0}{H_a}\right) + \frac{\sigma_H^2}{2\mu} \frac{d^2\mu}{dH^2} + \frac{Cv_H^2}{2} \frac{E_0^2}{H_a^2}\right), \quad (5)$$

$$\sigma_Y \approx \sigma_H \left[ \left( \mu + \mu \frac{E_0}{H_a} + H_a \frac{d\mu}{dH} \right) \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \right], \quad (6)$$

где  $H_a$ ,  $\sigma_H$ ,  $Cv_H$  – математическое ожидание, стандартное отклонение и коэффициент вариации слоя атмосферного увлажнения. Уравнения (5, 6) являются реализацией композиционного метода, связывающего статистические характеристики элементов водного баланса и физико-географических условий водосборов [5, 35, 36].

Функция  $\mu$  косвенно связана с суммарным атмосферным увлажнением (как отражение зонального распределения растительности и почвенного покрова), но эта связь значимо проявляется в основном только для усреднённых интервалов. В частности, для водосборов средних рек на территории бывшего СССР была выявлена статистически значимая линейная связь между осреднёнными по дециметровым интервалам годовыми значениями атмосферного увлажнения и функцией  $\mu$  (рис. 2; интервалы осреднения в мм: 300–399; 400–499, ...).

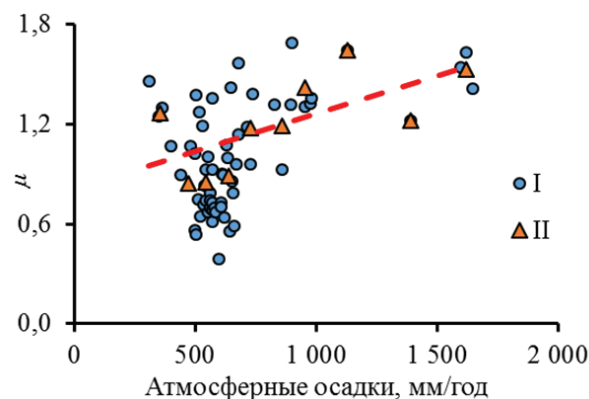


Рис. 2. Зависимость между суммой годовых атмосферных осадков и функцией  $\mu$  для средних рек на территории бывшего СССР: I – среднемноголетние значения для конкретных водосборов; II – усредненные значения для дециметровых интервалов атмосферного увлажнения. Уравнение регрессии построено по точкам (II):  $\mu = (0,455 \pm 0,181)H_a + (0,807 \pm 0,172)$ ,  $R^2=0,44$

Fig. 2. Relationship between the amount of precipitation and the function  $\mu$  for medium size rivers in the territory of the former Soviet Union: I are the annual values for a particular watershed; II are the average values of decimeter ranges of atmospheric moisture. The regression equation is constructed by the points (II):  $\mu = (0,455 \pm 0,181)H_a + (0,807 \pm 0,172)$ ,  $R^2=0,44$

С учётом этого для проведения палеогидрологических реконструкций можно принять два варианта дальнейшего упрощения уравнений (5), (6):

$$1) \frac{d\mu}{dH} \approx 0; \quad 2) \frac{d\mu}{dH} \approx \psi, \text{ где } \psi - \text{ постоянная величина}$$

для природной зоны или их комплекса. В первом случае уравнения (5), (6) приводятся к компактной форме (7), (8), использование которой в настоящее время (с учётом недостаточной изученности связи  $\mu = \mu(H_a)$ ), видимо, более предпочтительно:

$$Y_a \approx \mu H_a \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \left(1 + \frac{C_{V_H} E_0^2}{2H_a^2}\right), \quad (7)$$

$$\sigma_Y \approx \sigma_H \mu \left(1 + \frac{E_0}{H_a}\right) \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right). \quad (8)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Практическое использование уравнений (5), (6), (7) и (8) ограничено надёжностью данных о температуре атмосферного воздуха, об атмосферных осадках, лесистости и заболоченности территории. Климатические характеристики (средняя температура атмосферного воздуха  $T_a$  и средняя годовая сумма атмосферных осадков  $H_a$ ) определены путём суммирования современных среднемноголетних значений для конкретных территорий на конец 1990-х – начало 2000-х гг., согласно [37], и отклонений от нормы на начало 2000-х гг., принятых по [38]. В случаях, когда имелись сведения об отклонениях температуры атмосферного воздуха, но отсутствовали сведения об изменении атмосферного увлажнения, использовалась региональная зависимость, полученная по данным 64 метеостанций [39, 40] на равнинной части Западной Сибири:

$$H_a = (-8,375 \pm 0,733)T_a^2 - (64,459 \pm 4,980)T_a + (430,444 \pm 5,964); \quad R^2 = 0,65,$$

где  $H_a$  и  $T_a$  – средние значения годовой суммы атмосферных осадков и среднегодовой температуры атмосферного воздуха. Сумма среднемесячных положительных температур воздуха  $\Sigma T_{>0}$  вычислялась по региональной зависимости:

$$\Sigma T_{>0} = 68,197 \exp((0,059 \pm 0,003)T_a); \quad R^2 = 0,80.$$

Заболоченность на территории, соответствующей водосбору реки Чузик, определялась с учётом данных [41, 42] о периоде ( $9549 \pm 60$  лет) и интенсивности (в среднем 1,15 мм/год) формирования торфяной залежи толщиной 11 м на участке Васюганского болота (водораздел рек Чузик и Ича). В частности, толщина торфяной залежи и заболоченность 9550 лет назад приняты равными нулю. В прочие годы толщина торфяной залежи определена умножением периода её формирования на среднемноголетнюю интенсивность, а заболоченность – по линейной интерполяции между значениями заболоченности и толщины торфяной залежи по состоянию 9550 лет назад и в 1960-е гг. Ле-

систость данной территории определялась исходя из следующих допущений:

- около 10 тыс. лет назад, согласно [38, 43, 44], рассматриваемый район в целом характеризовался отсутствием значимой древесной растительности; при этом следует отметить, что основные палеолитические местонахождения сарганского возраста находятся несколько южнее [45], то есть там, где были относительно более благоприятные условия для жизни;
- в момент формирования очагов будущего Васюганского болота (9550 лет назад) в районе могли быть распространены тундро- и лесостепные ландшафты (для формирования торфов, включая древесные, необходимо наличие болотной растительности, которая не могла развиваться в отрыве от формирования растительного покрова на водосборе); размер лесистости в этот период принят по аналогии с современными лесостепными ландшафтами южной части Западной Сибири (10 %);
- примерно 4000 лет назад кочевые племена так называемой андроновской культуры мигрировали южнее рассматриваемой территории [46], что свидетельствует уже о значительной залесённости и заболоченности района, принятых в размере 40 и 20 % соответственно; оценка лесистости в размере 40 % определяется результатами анализа морфометрических характеристик средних рек Северной Евразии (территории бывшего СССР), показавшего, что: 1) заболоченность водосбора до 5–10 % может соответствовать практически любой лесистости (речные долины могут быть заболочены и в степной зоне); 2) уменьшение лесистости вследствие переувлажнения территории происходит ориентировочно при заболоченности 40 % и выше; 3) при заболоченности 15–40 % лесистость водосборов средних равнинных рек Сибири в таёжной зоне в целом составляет 40–70 % (рис. 3); с учётом этого выбран нижний предел устойчивого перехода от лесостепи к таёжной зоне.

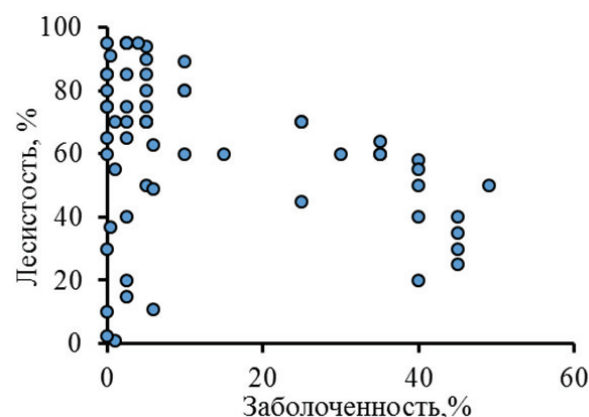


Рис. 3. Соотношение заболоченности и лесистости водосборов средних рек в Северной Евразии

Fig. 3. Relation between boggedness and forest cover watersheds of medium size rivers in Northern Eurasia

В случае территории, соответствующей современному водосбору реки Турухан, был использован несколько изменённый алгоритм: 1) из-за суровых климатических условий и наличия многолетней мерзлоты толщина торфяной залежи в целом незначительна, причём возраст торфяных болот в районе п. Игарка определён в размере 6030 лет [47]; 2) согласно [38], для севера Сибири были характерны температурные минимумы с восстановлением тундры примерно 9400 и 2900 лет назад, а температурный максимум с распространением лесных сообществ – около 6000 лет назад (принят возраст торфообразования 6030 лет); лесистость в периоды времени, соответствующие температурным минимумам, принята по аналогии с современными реками тундры (р. Щучья) в размере 1 %, а в периоды, соответствующие температурным максимумам, – пропорционально сумме положительных температур в 1960-е гг. и 6030 лет назад. Принятые оценки климатических и морфометрических характеристик приведены в таблице, а полученные на их основе значения слоя годового водного стока – на рис. 4, 5.

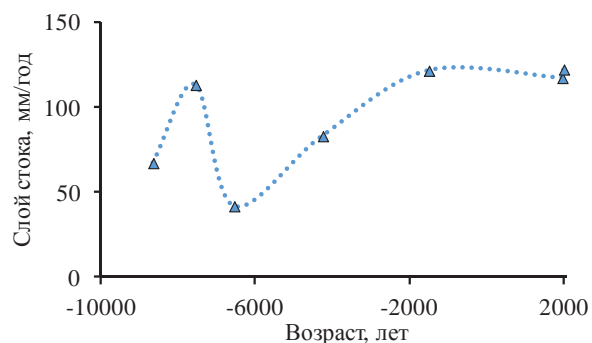


Рис. 4. Изменение слоя зонального годового водного стока на территории водосбора реки Чузик (в створе с. Осипово)

Fig. 4. Changing of the layer of zonal annual water runoff in the area of watershed of the river Chuzik (in cross section of Osipovo)

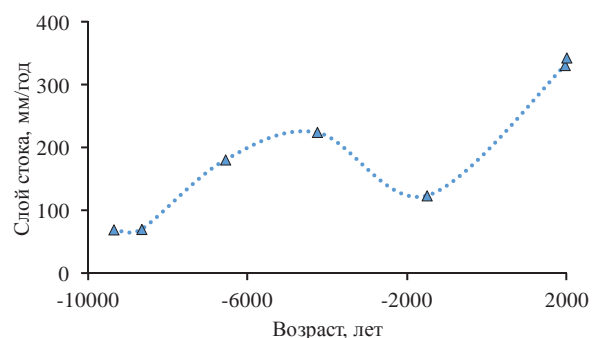


Рис. 5. Изменение слоя годового водного стока на территории водосбора реки Турухан (в створе п. Янов Стан)

Fig. 5. Changing of the layer of zonal annual water runoff in the area of watershed of the river Turukhan (in cross section of Yanov Stan)

Анализ результатов моделирования показал, что изменения в течение голоцена суммарного вод-

ного стока в северной и центральной части Сибири происходило несинхронно, даже несмотря на совпадение тенденций в изменении климата. Причиной этого является наличие нелинейных связей между водным стоком, атмосферным увлажнением, лесистостью и заболоченностью водосборов (рис. 2, 3). Совместное влияние лесистости и заболоченности, с одной стороны, сказывается на флуктуации водных циклов, обусловленных структурой водного баланса, а именно нелинейной связью стока и влагозапасов [35]. С другой стороны, особенности функционирования лесных сообществ (время жизни и половой зрелости, потребность в воде, термический режим атмосферы и почвогрунтов, требования к плодородию и водному режиму почв, закономерности сукцессии) определяют наличие дополнительных автоколебаний водного стока [30, 48].

Таблица. Климатические и морфометрические характеристики, принятые для расчёта годового зонального стока

Table. Climatic and morphometric characteristics taken for calculating the annual zonal runoff

Территория, соответствующая в настоящее время водосбору реки (в створе) The area currently corresponding to the river watershed (in cross section)	Расчётный год Hydrological year	$T_a$ , °C	$H_a$ , мм/год mm/year	$f_f$ , %	$f_m$ , %
р. Чузик (с. Осипово) River Chuzik (Osipovo)	-8650	-4,7	548	0	0
	-7550	-3,0	548	10	0
	-6550	2,3	455	16	4
	-4250	0,1	538	30	12
	-1500	-3,0	548	47	22
	1960	-1,5	564	64	35
	2000	-1,2	578	68	35
р. Турухан (п. Янов Стан) River Turukhan (Yanov Stan)	-9350	-7,4	449	0	
	-8650	-11,2	382	0	
	-6550	-4,2	607	11	1
	-4250	-6,5	520	38	
	-1500	-5,5	486	9	
	1960	-8,3	610	37	
	2000	-7,7	634	38	

Примечание:  $T_a$  – средняя температура атмосферного воздуха;  $H_a$  – средняя сумма атмосферных осадков за год;  $f_f$  и  $f_m$  – лесистость и заболоченность водосборной территории.

Note:  $T_a$  is the the average temperature of atmospheric air;  $H_a$  is the average sum of atmospheric precipitation for a year;  $f_f$  and  $f_m$  are the forestness and marshiness of river basin.

В целом возрастание лесистости водосборов при их незначительной заболоченности приводит к общему увеличению зонального стока. С увеличением заболоченности и/или деградацией лесных сообществ при похолодании величина стока снижается. Можно предположить, что снижение стока за счёт роста заболоченности также ограничено условиями функционирования болотных экосистем, поскольку развитие болота ограничено не только водными и тепловыми ресурсами, но и возможностью удержания воды в торфяной за-

лежи. Поэтому в какой-то момент прирост торфяной залежи прерывается и начинается формирование вторичной (внутриболотной) гидрографической сети, совсем не обязательно связанное с потеплением климата [49].

#### Выводы

Выявлено несинхронное изменение водного стока в северной и центральной части Западной Сибири, обусловленное различными тенденциями изменений климатических и геоэкологических условий. Более резкие и разнонаправленные колебания водного стока в голоцене в большей степени характерны для северных районов, соответствующих в настоящее время подзоне северной тайги, зонам лесотундры и тундры. В подзоне южной и средней тайги изменения водного стока менее выражены и более тесно связаны с болотными процессами.

В работах [50, 51] показано, что зависимость между модульными коэффициентами расходов воды и концентрациями вещества в водной среде по виду близка к функции гамма-распределения, причём основная часть наблюдений обычно соот-

ветствует кривой спада, имеющей вид обратной степенной зависимости. С учётом этого можно сделать вывод о том, что увеличение изменчивости водного стока в целом должно привести к определённому росту изменчивости содержаний ряда растворённых веществ и, следовательно, вероятности формирования гидрогеохимических аномалий.

В среднесрочной перспективе при продолжении потепления климата, влияние которого на водный цикл может быть чрезвычайно сложным и разнообразным [52], следует ожидать увеличение лесистости водосборов. При этом вероятен рост суммарного водного стока в районах с заболоченностью менее 40 %. На заболоченных территориях возможны смена растительных сообществ и перестройка внутриболотной гидрографической сети, в течение которых вероятны различные сценарии – от незначительного увеличения стока до его уменьшения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (проект № 14.Z50.31.0012), Томского политехнического университета (проект ВИУ\_VAF\_144\_2014).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions // Modelling in aquatic chemistry. – Paris: Nuclear energy agency, 1997. – P. 35–68.
2. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. Т. 1. Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / отв. ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
3. Изменчивость климата Европы в историческом прошлом / М.М. Чернавская, А.Н. Золотокрылин, А.Н. Кренке, М.Е. Ляхов, Р. Браздил и др. – М.: Наука, 1995. – 218 с.
4. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции в океане и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. – М.: Физматлит, 2012. – 272 с.
5. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 347 с.
6. A mid-Holocene climate reconstruction for eastern South America / L.F. Prado, I. Wainer, C.M. Chiessi, M.-P. Ledru, B. Turcq // Climate of the Past. – 2013. – V. 9. – P. 2117–2133.
7. Bostonalieva Zh.K. Late Quaternary Climate Change in Western Eurasia. A spatio-temporal review of climate proxies. PhD thesis. – Berlin, 2015. – 140 p.
8. Antipina T.G., Panova N.K., Korona O.M. The Holocene Dynamics of Vegetation and Environmental Conditions on the Eastern Slope of the Northern Urals // Russian Journal of Ecology. – 2014. – V. 45. – № 5. – P. 351–358.
9. Premke-Kraus M. Holocene environmental history of the Kara Sea (Siberian Arctic, Russia) inferred from marine palynological records. – Bremerhaven: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI), 2008. – 160 p.
10. Gajewski K. Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change // Global and Planetary Change. – 2015. – V. 128. – P. 14–23.
11. Dendroclimatic reconstruction of autumn–winter mean minimum temperature in the eastern Tibetan Plateau since 1600 AD / Rui-bo Zhang, Yu-jiang Yuan, Wen-shou Wei, Xiao-hua Gou, Shu-long Yu, Hua-ming Shang, Feng Chen, Tong-wen Zhang, Li Qin // Dendrochronologia. – 2015. – V. 33. – P. 1–7.
12. The Taimyr Peninsula and the Severnaya Zemlya archipelago, Arctic Russia: a synthesis of glacial history and palaeo-environmental change during the Last Glacial cycle (MIS 5ee2) // P. Moller, H. Alexanderson, S. Funder, C. Hjort // Quaternary Science Reviews. – 2015. – V. 107. – P. 149–181.
13. Кислов А.В. Изменения и изменчивость глобального климата // Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х т. Т. 1 / отв. ред. Н.С. Касимов и Р.К. Клиге. – М.: Научный мир, 2006. – С. 118–129.
14. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier et al. // Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – Ch. 4. – P. 111–154.
15. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change / Eds. R.K. Pachauri, L. Meyer // IPCC. – Geneva, Switzerland, 2015. – 151 p.
16. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. А.П. Муранова. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 373 с.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 408 с.
18. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
19. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеоздат, 1956. – 256 с.
20. Мезенцев В.С. Гидрологические расчёты в мелиоративных целях. – Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. – 84 с.
21. Методические рекомендации по учёту влияния хозяйственной деятельности на сток малых рек при гидрологических расче-

- тах для водохозяйственного проектирования / под ред. Е.Э. Булаховской. – Л.: Госкомгидромет, 1986. – 168 с.
22. Hendriks M.R. Introduction to Physical Hydrology. – Oxford; New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
23. Руководство по гидрологической практике. Т. II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. – Geneva, Switzerland, 2012. – 324 с.
24. Schreiber P. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa (German) // *Meteorol. Zs.* – 1904. – V. 21. – S. 441–452.
25. Feller W. An introduction to probability theory and its applications. V. 2. Second ed. New York; London; Toronto: John Wiley&Sons, Inc., 1971. – 738 p.
26. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 199 с.
27. СНиП II-A.6–72. Строительные нормы и правила. Часть II. Раздел А. Глава 6. Строительная климатология и геофизика. – М.: Госстрой СССР, 1973. – 320 с.
28. Кузин П.С., Бабкин В.И. Географические закономерности гидрологического режима рек. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 200 с.
29. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
30. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem Dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.
31. Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. Floods in a Changing Climate. Hydrologic Modelling. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 177 p.
32. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. – М.: МГУ, 2006. – 416 с.
33. Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. River runoff decrease in North-Eurasian plains during the Holocene optimum // *Water Resources.* – 2012. – V. 39. – № 1. – P. 69–81.
34. Handbook of applicable mathematics / ed. by E. Lloyd, W. Lederman. Vol. VI. P. A. – Chichester; New York; Brisbane; Toronto; Singapore: John Wiley&Sons, Inc., 1984. – 510 p.
35. Найдёнов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. – М.: Наука, 2004. – 318 с.
36. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 279 с.
37. СНиП 23–01–99\*. Строительная климатология. – М.: Госстрой, ГУП ЦПП, 2003. – 162 с.
38. Climate changes in Siberia / P.Ya. Groisman, T.A. Blyakharchuk, A.V. Chernokulsky et al. // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences* / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – Ch. 3. – P. 57–110.
39. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 718 с.
40. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 17. Тюменская и Омская области. – СПб.: Гидрометеоздат, 1998. – 702 с.
41. Лапшина Е.Д., Мульдьяров Е.Я. Основные этапы развития Большого Васюганского болота // *Большое Васюганское болото* / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 36–44.
42. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // *Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития* / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 174–179.
43. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2008. – 288 с.
44. Ахтерьякова А.В., Лещинский С.В. Результаты комплексного исследования двух голоценовых торфяников Тобольско-Прииртышского литофациального района // *Известия Томского государственного университета.* – 2014. – Т. 385. – С. 171–180.
45. Позднепалеолитическое местонахождение Шестаково / А.П. Деревянко, В.И. Молодин, В.Н. Зенин, С.В. Лещинский, Е.Н. Мащенко. – Новосибирск: Изд-во Института археологии и этнографии СО РАН, 2003. – 168 с.
46. Молодин В.И., Новиков А.В., Марченко Ж.В. Древняя и средневековая история южного Васюганья // *Большое Васюганское болото* / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 5–29.
47. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева и др. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
48. Кузнецов В.И., Козлов Н.И., Хомяков П.М. Математическое моделирование эволюции леса для целей управления водным хозяйством. – М.: ЛЕНАНД, 2005. – 232 с.
49. Савичев О.Г., Паромов С.В. Гидрологические аспекты образования болот в таёжной зоне Западной Сибири // *Известия Томского политехнического университета.* – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 154–161.
50. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. О методике определения фоновых и аномальных значений гидрохимических показателей // *Известия Томского политехнического университета.* – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 133–142.
51. Spatial Patterns of the Evolution of the Chemical Composition and Discharge of River Water in the Ob River Basin / O.G. Savichev, A.K. Mazurov, I.I. Pipko, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // *Doklady Earth Sciences.* – 2016. – V. 466. – Part 1. – P. 47–51.
52. Georgiadi A.G. The change of the hydrological cycle under the influence of global warming // *Hydrology for the Water Management of Large River Bas.* – 1991. – № 201. – P. 119–128.

Поступила 15.04.2016 г.

#### Информация об авторах

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Решетько М.В.**, кандидат географических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Моисеева Ю.А.**, аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.8: 556.5

**METHODS OF RECONSTRUCTION OF A ZONAL RUNOFF IN WESTERN SIBERIA IN HOLOCENE**

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

**Margarita V. Reshetko<sup>1</sup>,**  
MReshetko@tpu.ru

**Yulia A. Moiseeva<sup>1</sup>,**  
julchiky@mail.ru

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

**The relevance** of the research is determined by the necessity to study paleohydrological conditions, which play an important role in formation of geochemical anomalies. The methodology of such studies is currently not sufficiently developed, that affects the reasonableness and effectiveness of searches of minerals.

**The aim** of the research is to develop and substantiate the methods of paleohydrological reconstructions for determining the total runoff caused by the zonal climate.

**Methods:** geographical and hydrological and statistical methods, mathematical modeling of hydrological processes.

**Results and conclusions.** The authors have developed the mathematical model of formation of total zonal runoff. On its basis the methodology of paleohydrological reconstructions was proposed and tested. By means of the model the authors determined the non-synchronous change in the zonal water runoff in northern and central parts of Western Siberia, caused by different trends of climatic changes and geo-ecological conditions. It was shown that more abrupt and differently directed water runoff fluctuations during the Holocene are more typical for northern regions, currently corresponding to the northern taiga subzone, forest tundra and tundra zones. The changes of water runoff are less pronounced and more closely associated with wetland processes in the subzone of the southern and middle taiga. The authors made the conclusions that the increase in the water runoff variability as a whole would lead to a certain growth in the variability of the contents of a number of dissolved substances and consequently the probability of formation of hydrogeochemical anomalies. In the medium term the increase in forested catchments should be expected with continued warming. At the same time the increase in total water runoff is probable in areas with less than 40 % swamping.

**Key words:**

Paleohydrological reconstruction, zonal water flow, simulation and stochastic model of water flow, water balance, atmospheric moistening.

The research was financially supported by the Government of the Russian Federation (project no. 14.Z50.31.0012), Tomsk Polytechnic University (project БИУ\_VAF\_144\_2014).

**REFERENCES**

- Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions. *Modelling in aquatic chemistry*. Paris, Nuclear energy agency, 1997. pp. 35–68.
- Geologicheskaya ehvolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda. T. 1. Sistema voda–poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie* [Geological evolution and self-organizing of water–rock system. V. 1. Water–rock system in an earth’s crust: interaction, kinetic, balance, modelling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2005. 244 p.
- Chernyavskaya M.M., Zolotokrylin A.N., Krenke A.N., Lyakhov M.E., Brazdil R. *Izmenchivost klimata Evropy v istoricheskoy proshlom* [Changeability of Europe climate in the historical past]. Moscow, Nauka Publ., 1995. 218 p.
- Diansky N.A. *Modelirovanie tsirkulyatsii v okeane i issledovanie ego reaksii na korotkoperiodnyye i dolgoperiodnyye atmosferye vozdeystviya* [Modelling of circulation in the ocean and study of its response to short-period and long-period weather resistance]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012. 272 p.
- Kislov A.V. *Klimat v proshlom, nastoyashchem i budushchem* [Climate in the past, present and future]. Moscow, MAIK Nauka-Interperiodika Publ., 2001. 347 p.
- Prado L.F., Wainer I., Chiessi C.M., Ledru M.-P., Turcq B. A mid-Holocene climate reconstruction for eastern South America. *Climate of the Past*, 2013, vol. 9, pp. 2117–2133.
- Bostonalieva Zh.K. *Late Quaternary Climate Change in Western Eurasia A spatio-temporal review of climate proxies*. PhD thesis. Berlin, 2015. 140 p.
- Antipina T.G., Panova N.K., Korona O.M. The Holocene Dynamics of Vegetation and Environmental Conditions on the Eastern Slope of the Northern Urals. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 5, pp. 351–358.
- Premke-Kraus M. *Holocene environmental history of the Kara Sea (Siberian Arctic, Russia) inferred from marine palynological records*. Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI), 2008. 160 p.
- Gajewski K. Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change. *Global and Planetary Change*, 2015, vol. 128, pp. 14–23.
- Rui-bo Zhang, Yu-jiang Yuan, Wen-shou Wei, Xiao-hua Gou, Shu-long Yu, Hua-ming Shang, Feng Chen, Tong-wen Zhang, Li Qin. Dendroclimatic reconstruction of autumn–winter mean minimum temperature in the eastern Tibetan Plateau since 1600 AD. *Dendrochronologia*, 2015, vol. 33, pp. 1–7.
- Moller P., Alexanderson H., Funder S., Hjort C. The Taimyr Peninsula and the Severnaya Zemlya archipelago, Arctic Russia: a

- synthesis of glacial history and palaeo-environmental change during the Last Glacial cycle (MIS 5e2). *Quaternary Science Reviews*, 2015, vol. 107, pp. 149–181.
13. Kislov A.V. *Izmeneniya i izmenchivost globalnogo klimata* [Changes and variability of global climate]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Today's global environmental changes]. Eds. N.S. Kasimov, R.K. Klige. Moscow, Nauchny mir Publ., 2006. Vol. 1, pp. 118–129.
  14. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences*. Ch. 4. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. pp. 111–154.
  15. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Eds. R.K. Pachauri, L. Meyer. IPCC. Geneva, Switzerland, 2015. 151 p.
  16. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 16. Angara-Eniseyskiy rayon. Vyp. 1. Enisey* [Surface water resources of the USSR. Vol. 16. Angara-Yenisei region. Iss. 1. Yenisei]. Ed. by A.P. Muranov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973. 373 p.
  17. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 15. Altay i Zapadnaya Sibir. Vyp. 2. Srednyaya Ob* [Surface water resources of the USSR. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 2. Middle Ob]. Ed. by O.N. Panina. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 408 p.
  18. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin, UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
  19. Budyko M.I. *Teplovoy balans zemnoy poverkhnosti* [Heat balance of the earth's surface]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1956. 256 p.
  20. Mezentsev V.S. *Gidrologicheskie raschety v meliorativnykh tselyakh* [Hydrological calculations in reclamation purposes]. Omsk, Omsk SKHI Publ., 1982. 84 p.
  21. *Metodicheskie rekomendatsii po uchetu vliyaniya khozyaystvennoy deyatel'nosti na stok malyykh rek pri gidrologicheskikh raschetakh dlya vodokhozyaystvennogo proektirovaniya* [Guidelines to incorporate the impact of economic activity on the runoff of small rivers with hydrological calculations for water management design]. Ed. by E.E. Bulakhovskiy. Leningrad, Goskomgidromet Publ., 1986. 168 p.
  22. Hendriks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
  23. *Rukovodstvo po gidrologicheskoy praktike. T. II. Upravlenie vodnymi resursami i praktika primeneniya gidrologicheskikh metodov* [Guide to Hydrological Practices. V. II. Water management and the practice of hydrological methods]. Geneva, Switzerland, 2012. 324 p.
  24. Schreiber P. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa (German). *Meteorol. Zs.*, 1904, vol. 21, ss. 441–452.
  25. Feller W. *An introduction to probability theory and its applications*. Vol. 2. Second ed. New York; London; Toronto, John Wiley&Sons, Inc., 1971. 738 p.
  26. *Vodnye resursy i vodny balans territorii Sovetskogo Soyuza* [Water resources and water balance of the territory of the Soviet Union]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967. 199 p.
  27. *Stroitelnye normy i pravila. Chast II. Razdel A. Glava 6. Stroitel'naya klimatologiya i geofizika. SNiP II-A.6–72* [Building Regulations. P. II. Section A. Ch. 6. Building climatology and geophysics. SNiP II-A.6–72]. Moscow, Gosstroy SSSR, 1973. 320 p.
  28. Kuzin P.S., Babkin V.I. *Geograficheskie zakonomernosti gidrologicheskogo rezhima rek* [Geographic patterns of the hydrological regime of rivers]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 200 p.
  29. Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i massoobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy* [Modelling of heat and mass transfer of the land surface to the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
  30. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.
  31. Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. *Floods in a Changing Climate. Hydrologic Modelling*. New York, Cambridge University Press, 2012. 177 p.
  32. Rychagov G.I. *Obshchaya geomorfologiya* [General geomorphology]. Moscow, MSU Publ., 2006. 416 p.
  33. Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. River runoff decrease in North-Eurasian plains during the Holocene optimum. *Water Resources*, 2012, vol. 39, no. 1, pp. 69–81.
  34. *Handbook of applicable mathematics*. Eds. E. Lloyd, W. Lederman. Vol. VI. P. A. Chichester; New York; Brisbane; Toronto; Singapore, John Wiley&Sons, Inc., 1984. 510 p.
  35. Naydenov V.I. *Nelineynaya dinamika poverkhnostnykh vod sushy* [Nonlinear dynamics of surface water]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 318 p.
  36. Gelfan A.N. *Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka* [Dynamic-stochastic modeling of snowmelt runoff formation]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 279 p.
  37. *Stroitel'naya klimatologiya. SNiP 23–01–99\** [Building Climatology. SNiP 23–01–99\*]. Moscow, Gosstroy GUP CPP, 2003. 162 p.
  38. Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V. Climate changes in Siberia. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. Ch. 3, pp. 57–110.
  39. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Chasti 1–6. Vyp. 20. Tomskaya, Novosibirskaya, Kemerovskaya oblasti, Altayskiy kray* [Scientific and Applied Climate Handbook. Series 3. Long-term data. Parts 1–6. Vol. 20. Tomsk, Novosibirsk, Kemerovo Regions, Altai Territory]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. 718 p.
  40. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Chasti 1–6. Vyp. 17. Tyumenskaya i Omskaya oblasti* [Scientific and Applied USSR Climate Reference Book. Series. 3. Long-term data. Parts 1–6. Vol. 17. Tyumen and Omsk regions]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1998. 702 p.
  41. Lapshina E.D., Muldiyarov E.Ya. Osnovnye ehtapy razvitiya Bolshogo Vasyuganskogo bolota [Main Stages of Great Vasyugan swamp formation]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 36–44.
  42. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
  43. Maloletko A.M. *Evolutsiya rechnykh sistem Zapadnoy Sibiri v mezozoe i kaynozoe* [Evolution of the river systems of Western Siberia in the Mesozoic and Cenozoic]. Tomsk, TGU Publ., 2008. 288 p.
  44. Akhteryakova A.V., Leshchinsky S.V. Results of comprehensive research of two Holocene peatlands of the Tobolsk-Irtysh lithofacies area. *Tomsk State University Journal*, 2014, no. 385, pp. 171–180. In Rus.
  45. Derevyanko A.P., Molodin V.I., Zenin V.N., Leshchinsky S.V., Mashchenko E.N. *Pozdnepaleoliticheskoe mestonakhozhdenie Shestakovo* [Paleolithic Shestakovo location]. Novosibirsk, Institute of Archeology and Ethnography of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003. 168 p.

46. Molodin V.I., Novikov A.V., Marchenko Zh.V. Drevnyaya i srednevekovaya istoriya yuzhnogo Vasyuganya [Ancient and medieval history of the south Vasyugan]. *Bolshe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 5–29.
47. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i Ko Publ., 2001. 584 p.
48. Kuznetsov V.I., Kozlov N.I., Khomyakov P.M. *Matematicheskoe modelirovanie evolyutsii lesa dlya tseley upravleniya lesnym khozyaystvom* [Mathematical modeling of forest evolution for forest management]. Moscow, LENAND Publ., 2005. 232 p.
49. Savichev O.G., Paromov S.V. Hydrological aspects of bogs formation in taiga zone of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 154–161. In Rus.
50. Savichev O.G., Nguen V.L. The technique for determining background and extreme values of hydrogeochemical parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 133–142. In Rus.
51. Savichev O.G., Mazurov A.K., Pipko I.I., Sergienko V.I., Semilev I.P. Spatial Patterns of the Evolution of the Chemical Composition and Discharge of River Water in the Ob River Basin. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, P. 1, pp. 47–51.
52. Georgiadi A.G. The change of the hydrological cycle under the influence of global warming. *Hydrology for the Water Management of Large River Bas*, 1991, no. 201, pp. 119–128.

Received: 15 April 2016.

#### Information about the authors

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

**Margarita V. Reshetko**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Yulia A. Moiseeva**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.



УДК 550.834

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО СДВИГА МЕЖДУ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ТРАССАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ФАЗОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

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

Злобина Елена Вячеславовна<sup>1</sup>,  
elena\_zlobina@list.ru

Лаевский Виктор Евгеньевич (V. Geringer)<sup>2</sup>,  
geringer@dhw-ravensburg.de

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

<sup>2</sup> Государственный объединенный университет Баден-Вюртемберга,  
Германия, D-88045, Friedrichshafen, Fallenbrunnen, 2.

**Актуальность работы.** Процедуры определения временного сдвига, получившие широкое распространение на практике, не всегда гарантируют правильность определения статических поправок. Возникающие при этом ошибки приводят к искажению кинематических параметров отраженных волн, что отрицательно сказывается на всех дальнейших построениях. Поэтому разработка эффективного метода определения временных сдвигов является актуальной проблемой, с успешным решением которой связываются перспективы повышения достоверности построения структур, подготавливаемых для разведки на нефть и газ.

**Цель исследования:** разработать и исследовать надежность алгоритма определения временных сдвигов между сейсмическими трассами на основе оптимальной и субоптимальной обработки фазочастотных характеристик отраженных волн, регистрируемых при поиске нефтяных и газовых месторождений.

**Методы исследования:** статистический синтез и анализ оптимальных решающих правил, цифровая обработка сигналов, методы дискретного преобразования Фурье, математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

**Результаты.** Показана возможность извлечения полезной информации из фазочастотных характеристик сейсмических сигналов для получения эффективных оценок временных сдвигов между трассами. На основе теории статистических решений построен оптимальный алгоритм определения временных сдвигов по мгновенным взаимным фазовым спектрам. Для практической реализации алгоритма предложен переход от оптимальной к субоптимальной обработке компонент мгновенного взаимного фазового спектра путем равновесного суммирования. Показано, что равновесная обработка приводит к уменьшению суммарного отношения сигнал/шум для практически используемой полосы частот почти вдвое. Однако даже такие потери позволяют получать достаточно надежные оценки временных сдвигов при наличии интенсивных нерегулярных помех и симметричных распределениях временных сдвигов с большой дисперсией.

### Ключевые слова:

Сейсмические волны, статические поправки, функция взаимной корреляции, взаимные фазовые спектры, фазочастотное отслеживание.

### Введение

В процессе обработки сейсмических наблюдений учет статических поправок, связанных с рельефом дневной поверхности и неоднородностями верхней части разреза, является одной из важнейших процедур интерпретации данных сейсмозаписки. Качество выполнения этой процедуры непосредственно влияет как на надежность выделения и корреляцию отраженных волн, так и на достоверность последующих глубинных построений. Наличие в наблюдаемых временах статических сдвигов препятствует синфазному суммированию полезных волн, и именно поэтому первой важной проблемой в обработке сейсмических данных явля-

ется устранение этих сдвигов посредством введения процедур коррекции статических поправок [1–6].

Одним из основных этапов при проведении коррекции статических поправок является определение временного сдвига между сейсмическими трассами. Различаясь в деталях, большинство алгоритмов автоматического определения временных сдвигов построены на основе вычисления функций взаимной корреляции (ФВК) между трассами сейсмограммы или трассами сейсмограммы и набором эталонных трасс [7–10]. Вместе с тем такие способы определения временного сдвига, получившие широкое распространение на практике, не всегда гарантируют правильность определения

статических поправок. Возникающие при этом ошибки приводят к искажению кинематических параметров отраженных волн, что отрицательно сказывается на всех дальнейших построениях [7].

Таким образом, разработка новых методов определения временных сдвигов является актуальной проблемой, с успешным решением которой связываются перспективы повышения достоверности построения структур, подготавливаемых для разведки на нефть и газ.

Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование новых информативных параметров сейсмических сигналов, а именно их фазовых спектров. В фазу сигнала, точнее в сложный закон изменения его фазового спектра, заложена полная информация о временном положении сигнала, поэтому оптимальная обработка фазочастотной характеристики (ФЧХ) сигнала реализует оптимальный метод определения его временного положения [11–13]. Вопросам извлечения информации из фазочастотных характеристик сейсмических сигналов для оценки временных сдвигов между трассами был посвящен ряд работ [14–16]. Например, в [14] показано, что оценки временного сдвига  $\hat{\tau}$  можно определить из следующего выражения:

$$\hat{\tau} = \frac{\sum_{\omega} \omega [\varphi_{\text{эт.}}(\omega) - \varphi_l(\omega)]}{\sum_{\omega} \omega^2}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{эт.}}(\omega)$  – фазочастотная характеристика эталонной трассы;  $\varphi_l(\omega)$  – ФЧХ  $l$ -й трассы сейсмограммы.

Однако, к сожалению, подобные алгоритмы до настоящего времени не нашли широкого применения при обработке и интерпретации реальных сейсмических материалов, что, по-видимому, связано прежде всего с трудностью идентификации реальных ФЧХ сейсмических сигналов [15–17], а вследствие этого – небольшим количеством исследований в области синтеза и анализа фазочастотных алгоритмов [18, 19], для обработки сейсмической информации.

#### Фазочастотный алгоритм определения временных сдвигов

В настоящей работе производится дальнейшее изучение информационных возможностей ФЧХ сейсмических трасс для определения временных сдвигов, создание на этой основе новых алгоритмов и исследования их в ситуациях, где применяемые на практике алгоритмы на основе ФВК не обеспечивают требуемой точности оцениваемых параметров.

Сначала построим процедуру определения временного положения сейсмических сигналов  $\tau$ , когда оптимальной обработке подвергаются лишь их ФЧХ. Для этого примем, что сигнал слабый ( $\rho(\omega_k) \leq 1$ ,  $\rho(\omega_k)$  – отношение сигнал/помеха на частоте  $\omega_k$ ) и регистрируется на фоне аддитивного нормального шума.

Функция правдоподобия в этом случае может быть представлена в виде

$$L(\tau) = W(\Delta\varphi(\omega_1), \Delta\varphi(\omega_2), \dots, \Delta\varphi(\omega_m) / \tau), \quad (2)$$

где  $W(\Delta\varphi(\omega_k) / \tau)$  – многомерная условная плотность вероятности  $\Delta\varphi(\omega_k)$ ;  $\Delta\varphi(\omega_1), \Delta\varphi(\omega_2), \dots, \Delta\varphi(\omega_m)$  – отклонения ФЧХ смеси сигнала с помехой от ФЧХ сигнала при различных значениях  $\tau$ .

Одномерная плотность вероятности для  $\Delta\varphi(\omega_k)$  приведена в [20]. Тогда, рассматривая ее как функцию от  $\tau$  и учитывая, что  $\tau$  является неэнергетическим параметром, запишем:

$$W(\Delta\varphi(\omega_k) / \tau) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\rho^2(\omega_k)}{2}\right) + \frac{\rho(\omega_k)}{\sqrt{2\pi}} \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau) \times \\ \times \Phi[\rho(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau)] \times \\ \times \exp\left(-\frac{\rho^2(\omega_k)}{2} \sin(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau)\right), \quad (3)$$

где  $\Phi$  – преобразование Лапласа.

Теперь, выбирая  $\Delta\omega$  так, чтобы  $\Delta\varphi(\omega_k)$  ( $k = \overline{1, m}$ ) были статистически независимы, выражение (2) можно переписать в виде

$$L(\tau) = \prod_{k=1}^m W\{\Delta\varphi(\omega_k) / \tau\}, \quad (4)$$

где  $W(\Delta\varphi(\omega_k) / \tau)$  – определяется из (3);  $m = \frac{\Omega}{\Delta\omega}$  – число анализируемых частотных компонент;  $\Delta\omega$  – шаг дискретизации по частоте.

Прологарифмируем (4) и, опуская члены, не зависящие от  $\tau$ , для случая слабого сигнала ( $\rho(\omega_k) \leq 1$ ) получим:

$$\ln L(\tau) = \sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k) \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau). \quad (5)$$

Тогда оптимальную оценку  $\hat{\tau}_{\text{опт}}$  можно найти из решения уравнения

$$\left. \frac{\partial}{\partial \tau} \ln L(\tau) \right|_{\tau = \hat{\tau}_{\text{опт}}} = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6), где  $\ln L(\tau)$  описывается (5), не позволяет в явном виде получить  $\hat{\tau}_{\text{опт}}$ . Однако, если учесть, что  $\tau$  принимает конечное число значений из некоторого интервала  $[t_1, t_2]$ , то  $\hat{\tau}_{\text{опт}} = \tau_0$ , при котором

$$\ln L(\tau_0) = \max\{\ln L(\tau)\}, \\ \tau \in [t_1, t_2]. \quad (7)$$

Покажем, что критерий (7) является также оптимальным и для сильных сигналов. При сильном сигнале флуктуации ФЧХ незначительны, поэтому (5) можно представить в виде

$$\ln L(\tau) = \sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k) (\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau)^2. \quad (8)$$

Тогда из решения уравнения (6) с учетом (8) получим:

$$\hat{\tau}_{\text{опт}} = \frac{\sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k) \omega_k \Delta\varphi(\omega_k)}{\sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k) \omega_k^2}. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает известную оценку временного положения сильного сигнала [13], когда оптимальной обработке подвергается его ФЧХ. Таким образом, критерий (5) является оптимальным как для случая слабых сигналов, так и для случая сильных сигналов, в то время как критерий (9) оптимальным для слабых сигналов не является. При этом дисперсия оценки  $\hat{\tau}_{\text{опт}}$  по критерию (9) для сильных сигналов совпадает с предельно достижимой и составляет:

$$\sigma_{\hat{\tau}_{\text{опт}}}^2 = [q_{\Sigma}^2(\sigma\omega)^2]^{-1},$$

где  $q_{\Sigma}^2 = \sum_{k=1}^m \rho^2(\omega_k)$  – суммарное отношение сигнал/помеха;  $\sigma\omega$  – среднеквадратическая ширина спектра сигнала.

Принимая  $\Delta\varphi(\omega_k) = \varphi_{\text{эт.}}(\omega_k) - \varphi(\omega_k)$ , нетрудно показать, что выражение (1) является частным случаем критерия (9) и дает оптимальную оценку временного положения сильного сигнала только для случая, когда отношение сигнал/помеха в анализируемой полосе частот является константой.

Для слабых сигналов дисперсия оптимальной оценки, по сравнению со случаем сильного сигнала, возрастает в  $4/\pi$  раз:

$$\sigma_{\hat{\tau}_{\text{опт}}}^2 = \frac{4}{\pi q_{\Sigma}^2(\sigma\omega)^2} = \frac{4}{(q_{\Sigma}')^2(\sigma\omega)^2}. \quad (10)$$

Для реализации оптимального алгоритма, как видно из (5), необходимо знать распределение отношения сигнал/помеха  $\rho(\omega)$  в полосе частот  $\Omega$ . На практике получить достаточно надежные оценки  $\rho(\omega)$  для  $\omega \in \Omega$  весьма сложно. Поэтому предлагается принять в (5)  $\rho(\omega) = \text{const}$  для  $\omega \in \Omega$ , т. е. перейти к равновесной обработке компонент фазового спектра. В этом случае, естественно, можно говорить только о квазиоптимальности получаемых результатов.

Оценим точность получаемых оценок временного положения сигналов  $\hat{\tau}$  при переходе к равновесной обработке. Для этого примем в выражении (5)  $\rho(\omega) = \text{const} = 1$  ( $\omega \in \Omega$ ) и получим:

$$\ln L_1(\tau) = \sum_{k=1}^m \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau). \quad (11)$$

Как следует из (10), дисперсия оценки  $\tau$  определяется суммарным отношением сигнал/помеха  $q_{\Sigma}$  и среднеквадратической шириной спектра сигнала  $\sigma\omega$ . Так как при переходе от (5) к (11)  $\sigma\omega$  не изменяется, найдем чему будет равно  $q_{\Sigma}'$  при использовании критерия (11). Для этого воспользуемся методикой оценки потерь  $\eta$  при равновесной обработке многочастотного сигнала [21]. В нашем случае имеем:

$$\eta = (q_{\Sigma}' / q_{\Sigma}'')^2 - 1, \quad (12)$$

где  $q_{\Sigma}'$  – суммарное отношение сигнал/помеха для критерия (5);  $q_{\Sigma}''$  – суммарное отношение сигнал/помеха для критерия (11).

Тогда, как следует из [18],  $\eta_{\text{max}}$  для (12) составляет:

$$\eta_{\text{max}} = \sum_{k=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2 - 1$$

или

$$(q_{\Sigma}'')^2 = \frac{(q_{\Sigma}')^2}{\sum_{k=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2}.$$

Теперь, заменяя в (10)  $(q_{\Sigma}')$  на  $(q_{\Sigma}'')$ , получим дисперсию оценки  $\tau$  для критерия (11):

$$\sigma_{\hat{\tau}}^2 = \frac{4 \sum_{k=1}^m (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2}{\pi q_{\Sigma}^2(\sigma\omega)^2}.$$

Как и следовало ожидать, потеря оптимальности приводит к снижению точности получаемых оценок, причем  $\sigma_{\hat{\tau}}^2$  зависит от числа учитываемых гармоник в спектре сигнала. С ростом  $m$  дисперсия оценки  $\sigma_{\hat{\tau}}^2$  по отношению к предельно достижимой для учитываемого числа частотных компонент увеличивается, так, при  $m=3$   $\eta_{\text{max}}=0,27$ , а при  $m=10$   $\eta_{\text{max}}=0,754$ . Однако даже при  $m=20$  точность получаемых оценок достаточно высока. Рассмотрим практическую реализацию критерия с равновесной обработкой (11) для определения временных сдвигов между сейсмическими трассами.

Как следует из (11), для его реализации необходимо вычислить  $\Delta\varphi(\omega_k) = \varphi_{\text{эт.}}(\omega_k) - \varphi(\omega_k)$  для  $(k=1, m)$  при различных  $\tau \in [t_1, t_2]$  – диапазон возможных значений временных сдвигов. Эту процедуру можно осуществить либо путем вычисления аргументов преобразования Фурье – преобразований отдельно эталонной трассы и трассы сейсмограммы, либо вычислением взаимного фазового спектра между этими трассами. Второй путь требует дополнительного вычисления ФВК между трассами, однако он позволяет получить более надежные оценки  $\hat{\Delta\varphi}(\omega_k)$  для  $(k=1, m)$ . Поэтому остановимся на этом пути. Тогда процедура определения временного сдвига, в соответствии с (11), сводится к вычислению мгновенного взаимного фазового спектра (МВФС) в интервале  $[t_1, t_2]$ . Мгновенный фазовый спектр является функцией, изменяющейся во времени и по частоте, и определяется как

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{эт.}i}(\omega, \tau) &= \Delta\varphi(\omega) - \omega\tau = \\ &= \text{Arg} \int_{\tau}^{T+\tau} R_{\text{эт.}i}(t) e^{-j\omega\left(t - \frac{T}{2} - \tau\right)} dt, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $R_{\text{эт.}i}(t)$  – ФВК между эталонной трассой и  $k$ -й трассой сейсмограммы;  $T$  – интервал расчета взаимного фазового спектра (окно анализа), включающий 3–5 видимых периодов ФВК.

Таким образом, как следует из (13), мгновенный взаимный фазовый спектр находится «скользящим» интегрированием: интервал интегрирования имеет постоянную длину  $T$  и перемещается по ФВК с шагом  $\Delta t$  ( $\Delta t$  – шаг дискретизации трассы) в окрестности ее глобального экстремума; для каждого мгновенного положения окна анализа (конкретного  $\tau \in [t_1, t_2]$ ) вычисляется взаимный фазовый спектр, при этом базисные функции, независимы от положения окна, считаются на отрезке  $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$ .

В качестве оценки временного сдвига между трассами принимается  $\hat{\tau}$ , при котором достигается максимум логарифма функции качества [16] для рассчитанного мгновенного взаимного фазового спектра в интервале  $\tau \in [t_1, t_2]$ . Нетрудно увидеть, что определяемая таким образом оценка временного сдвига является точкой центра симметрии окрестности ФВК, включающей глобальный экстремум. Поскольку центральная симметричная оценка носит интегральный характер, то она должна быть более устойчивой, чем положение максимума ФВК [22, 23].

Теперь проведем исследование эффективности данного критерия для определения временных сдвигов в ситуациях, где применяемые на практике алгоритмы, основанные на расчете и анализе функций взаимной корреляции (ФВК), не обеспечивают требуемой точности получаемых оценок временных сдвигов.

Рассмотрим ситуации, при которых возникают существенные погрешности при оценке сдвига по положению максимумов ФВК [7]:

- симметричные распределения временных сдвигов  $\tau$  с дисперсией, превышающей половину видимого периода волны;
- распределения с резкой асимметрией;
- наличие интенсивных нерегулярных помех.

Будем считать, что в процессе обработки сейсмических данных производится вычисление ФВК между трассами сейсмограммы и набором эталонных трасс. Тогда взаимная спектральная плотность между трассой сейсмограмм и эталонной трассой без учета нерегулярных помех имеет вид [7]

$$G_{\text{эт.,.}}(\omega) = \gamma \bar{a}^2 (A_s^2(\omega)) \Psi_{\tau}(\omega),$$

где  $\gamma$  – среднее число сейсмических сигналов, появляющихся в единицу времени;  $\bar{a}^2 = M\{a_i^2\}$  – математическое ожидание квадратов амплитуд сигналов;  $A_s(\omega)$  – амплитудный спектр сигнала;  $\Psi_{\tau}(\omega)$  – характеристическая функция временного сдвига  $\tau$  (сопряженное преобразование Фурье от плотности вероятностей  $W(\tau)$ ).

В этом случае взаимный фазовый спектр записывается как

$$\Delta\varphi(\omega) = \arctg \left[ \frac{\text{Im}\{\Psi_{\tau}(\omega)\}}{\text{Re}\{\Psi_{\tau}(\omega)\}} \right]. \quad (14)$$

Если дисперсия скоростей полезных волн в интервале вычисления ФВК равна нулю, то

$$\Delta\varphi(\omega) = \arctg[\text{tg}\omega\bar{\tau}] = \omega\bar{\tau},$$

и средний сдвиг между трассами  $\tau$  – определяется точно из условия максимизации (11):

$$\hat{\tau} = \bar{\tau}.$$

При наличии дисперсии волн по скорости проанализируем последовательно ситуации симметричного распределения временных сдвигов и распределения с резкой асимметрией. Возьмем в качестве примера симметричного распределения равномерное распределение временных сдвигов. В [7] показано, что при параметре разброса  $\delta > T_{\text{вид}}/2$  определение сдвига по положению максимума ФВК становится ненадежным. Запишем характеристическую функцию для равномерного распределения:

$$\Psi_{\tau}(\omega) = \delta^2 \sin c(2\delta\omega) e^{j\omega\bar{\tau}}, \quad (15)$$

и, подставляя (15) в (14), а найденное выражение в (11), окончательно получим:

$$\ln L_1(\tau) = \sum_{k=1}^m \cos(\omega\bar{\tau} - \omega\tau). \quad (16)$$

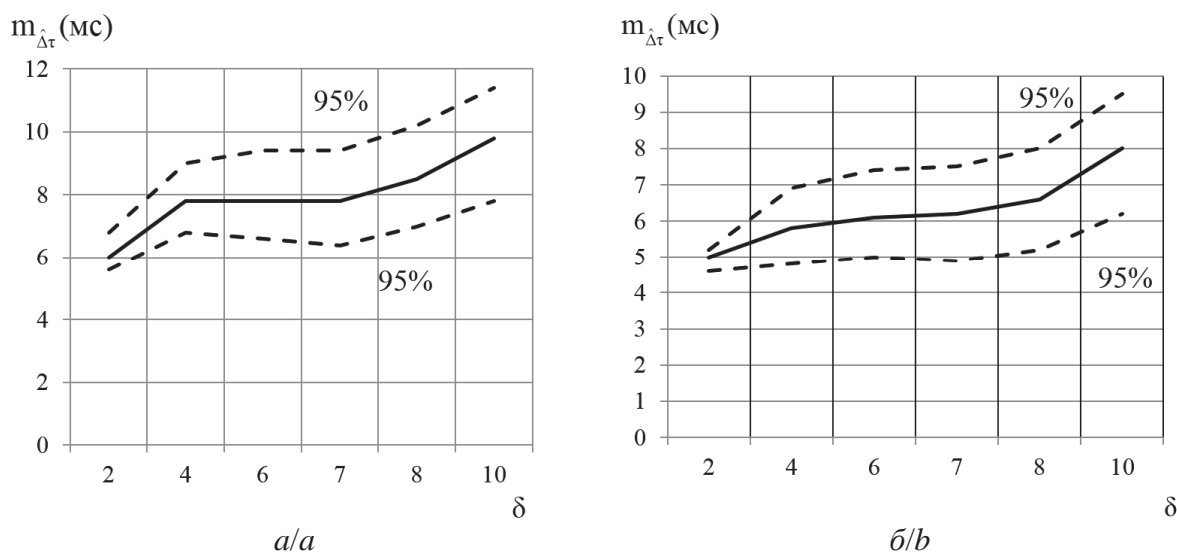
Из (16) видно, что максимум  $\ln L_1(\tau)$  независимо от величины  $\delta$  достигается при  $\hat{\tau} = \bar{\tau}$ , то есть сдвиг между трассами определяется верно. Следовательно, в данном случае предлагаемый алгоритм устраняет ошибки, возникающие при определении сдвига по положению максимума ФВК.

#### Результаты экспериментов

Исследование эффективности алгоритма определения сдвигов по МВФС путем максимизации (11) для распределений сдвигов с резкой асимметрией проводилось с помощью статистического моделирования на ЭВМ. При этом в качестве примера распределения с резкой асимметрией было выбрано распределение Рэлея.

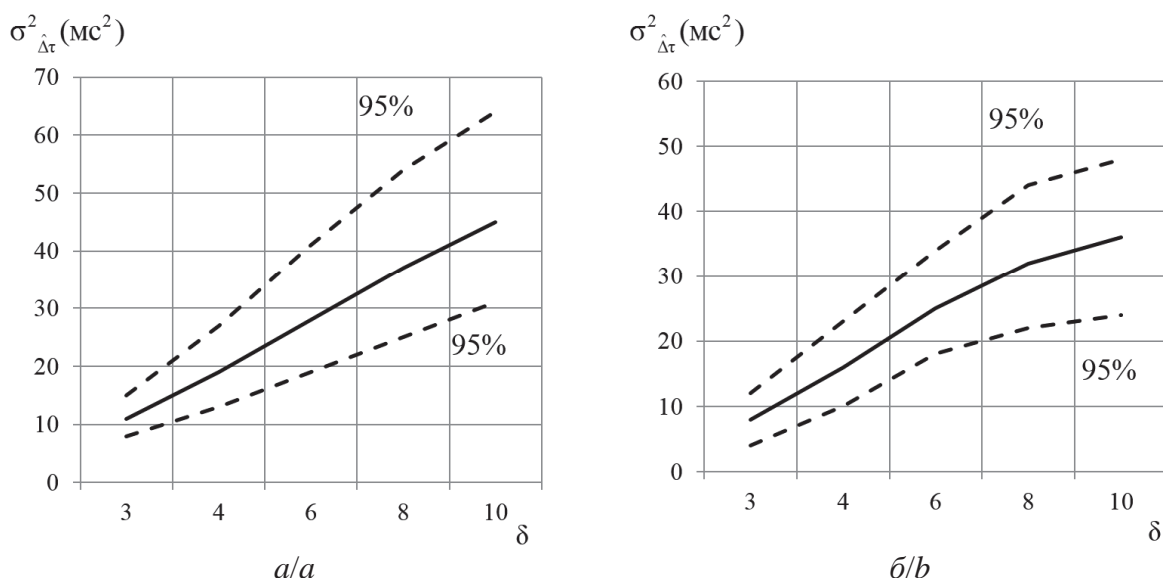
На рис. 1 и 2 приведены оценки математического ожидания и дисперсии временного сдвига в зависимости от величины параметра разброса в распределении Рэлея, найденные, соответственно, по положению максимума ФВК и предлагаемому алгоритму. Из рисунков видно, что для обоих алгоритмов получаемые оценки оказываются смещенными относительно среднего временного сдвига между трассами, и тем в большей степени, чем больше разброс распределения Рэлея. Однако смещение оценок и их дисперсии у предлагаемого алгоритма (рис. 1, б и 2, б) несколько ниже, чем в случае использования ФВК (рис. 1, а и 2, а). Следовательно, предлагаемый алгоритм при распределениях сдвигов с резкой асимметрией не устраняет полностью ошибок, свойственных ФВК в этом случае.

Исследование эффективности предлагаемого алгоритма определения сдвигов при интенсивных нерегулярных помехах проводилось также путем



**Рис. 1.** Оценка математического ожидания временных сдвигов между трассами: а) ФВК; б) МВФС

**Fig. 1.** Assessment of a population mean of temporary shifts between traces: a) mutual correlation functions (MCF); b) instantaneous mutual phase spectra (IMPhS)



**Рис. 2.** Оценка дисперсии временных сигналов между трассами: а) ВКФ; б) МВФС

**Fig. 2.** Assessment of dispersion of temporary signals between traces: a) MCF; b) IMPhS

статистического моделирования на ЭВМ. На рис. 3 показаны оценки дисперсии временного сдвига, найденного по двум сопоставляемым алгоритмам, когда анализируемые трассы содержали аддитивную помеху. Сравнение результатов показывает, что алгоритм определения сдвигов по МВФС (рис. 3, б) обеспечивает более высокую помехоустойчивость при низких отношениях сигнал/помеха ( $\mu \leq 2$ ), чем алгоритм на основе ВКФ (рис. 3, а).

Этот эффект объясняется тем, что, как уже отмечалось выше, центральная симметричная оценка (11) носит интегральный характер и, следовательно, является более устойчивой при нерегуляр-

ных помехах по сравнению с положением глобального максимума ФВК.

#### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что предлагаемый фазочастотный алгоритм позволяет в ряде практически важных случаев, а именно при наличии интенсивных нерегулярных помех и симметричных распределений временных сдвигов с большой дисперсией, существенно повысить точность и достоверность определения временных сдвигов по сравнению с методами, базирующимися на анализе ФВК.

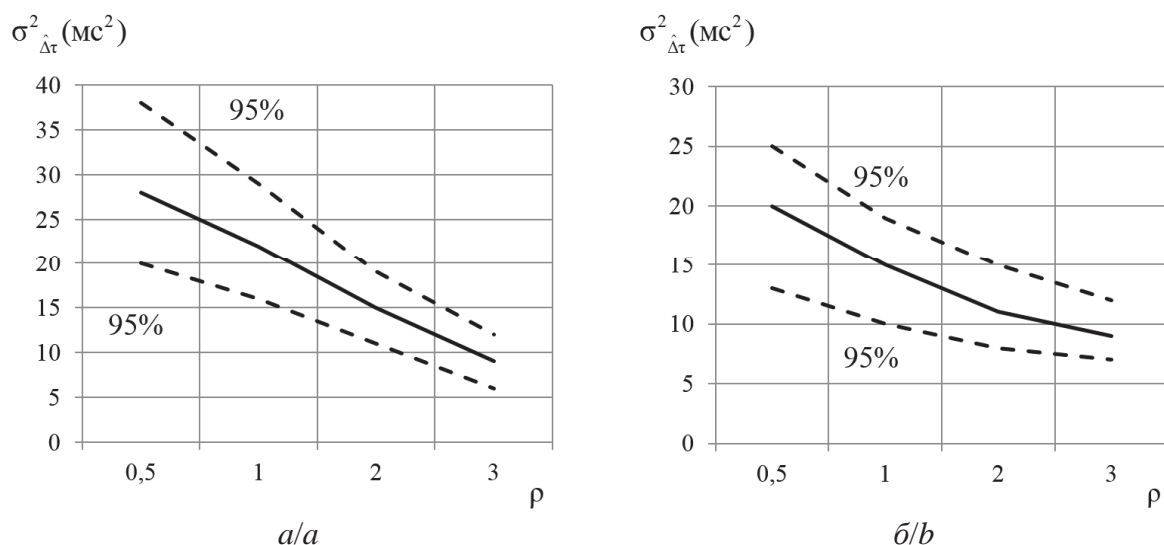


Рис. 3. Оценка дисперсии временных сдвигов между трассами при наличии помех: а) ВКФ; б) МВФС

Fig. 3. Assessment of dispersion of temporary shifts between traces at noises: a) MCF; b) IMPhS

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев В.С., Коротков И.П., Жуков А.П. Способы учета сложно построенной верхней части разреза в Западной Сибири // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 3. – С. 66–78.
2. Kearey Ph., Brooks M., Hill I. An Introduction to Geophysical Exploration. – 3<sup>rd</sup> ed. – US: Wiley-Blackwell, 2002. – 272 p.
3. Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A. Estimation and correction of near-surface time anomalies // Geophysics. – 1974. – V. 39. – P. 441–463.
4. Douma H., Haney M. Surface-wave inversion for nearsurface shear-wave velocity estimation at Coronation field // 81<sup>st</sup> SEG Annual Meeting. Expanded Abstracts. – San Antonio, 2011. – P. 1411–1415.
5. Finite Difference Modeling to Evaluate Acquisition and Processing Parameters on Resolution of Land Seismics / O. Adamovich, K. Erov, I. Korotkov, P.C.H. Veeken // 72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2010. – Barcelona, 2010. DOI: 10.3997/2214-4609.201401101.
6. Korotkov I., Veeken P.C.H., Kozyrev V. Interactive Static Corrections to Avoid Mis-interpretation of Seismic Data Due to Near-surface Velocity Changes // 72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2010. – Barcelona, 2010. DOI: 10.3997/2214-4609.201401294.
7. Яновский А.К. Использование функций взаимной корреляции сейсмических трасс для увязки сейсмических наблюдений // Дискретная корреляция сейсмических волн. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 50–72.
8. An interactive solution for resolving mid-wavelength static anomalies / V. Kozyrev, Al. Zhukov, I. Korotkov, Ar. Zhukov // The Leading Edge. – 2004. – V. 23. – № 3. – P. 270–274.
9. Салищев М.В., Сысоев А.П. Уточнение модели коррекции статистических поправок // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 3. – С. 61–65.
10. Shaun Strong, Steve Hearn. Statics correction methods for 3D converted-wave (PS) seismic reflection // Exploration Geophysics. URL: <http://dx.doi.org/10.1071/EG15115> (дата обращения: 05.03.2016).
11. Худяков Г.И. О потенциальной точности определения временного положения флюктуирующих сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Общие вопросы радиоэлектроники. – 1984. – Вып. 8. – С. 55–60.
12. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. – 1988. – № 9. – С. 77–83.
13. 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.
14. Зенов А.А. Вычисление оптимального временного сдвига между сейсмическими трассами // Разведочная геофизика. – 1977. – Вып. 76. – С. 18–21.
15. Данквардт Э., Патцер У. Проблемы использования фазовых спектров сейсмических данных // Труды 30-го Международного географического симпозиума. Стендовые доклады. – М., 1985. – Ч. 2. – С. 132–142.
16. Митрофанов Г.М. Обработка фазовых спектров многоканальных сейсмограмм // Геология и геофизика. – 1986. – № 10. – С. 99–109.
17. Каныгин М.Ю., Петрова Н.В. Согласование фазовых спектров сигналов при формировании обобщенных сейсмических проектов // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 1. – С. 56–59.
18. Методы фазочастотного прослеживания отраженных волн и их применения в задачах обработки сейсмической информации / В.П. Иванченков, А.И. Кочегуров, Н.А. Купина, О.В. Орлов // Технология сейсморазведки. – 2013. – № 3. – С. 5–10.
19. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Применение методов фазочастотного анализа сейсмических волн для изучения окоскважинного пространства // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 58–63.
20. Гольдин С.В. К теории спектрально-статистического метода обработки сейсмограмм // Геология и геофизика. – 1976. – № 1. – С. 138–149.
21. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Советское Радио. – 1975. – 296 с.

22. Hezo A., Schwatz S. Alternatives cross correlation for time delay estimation // ICA SSP 84; IEEE Int. conf. Acoust., Speech, and Signal Process. – San Diego, Calif., 1984. – V. 1. – P. 15.411–15.414.
23. Miller L.E., Lee J.S. Error analysis of time delay estimation using a finite integration time correlator // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1981. – V. 29. – P. 490–496.

*Поступила 26.04.2016 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.

**Злобина Е.В.**, магистрант кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Лаевский В.Е. (V. Geringer)**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Регенеративные источники энергии и автомобильная электроника» Государственного объединенного университета Баден-Вюртемберга.

UDC 550.834

## DEFINITION OF TEMPORARY SHIFT BETWEEN SEISMIC TRACES ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF THEIR PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS

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

am@am.tpu.ru

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

kaicc@tpu.ru

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

hungnx@tpu.ru

Elena V. Zlobina<sup>1</sup>,

elena\_zlobina@list.ru

Viktor Geringer<sup>2</sup>,

geringer@dhw-ravensburg.de

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

<sup>2</sup> Baden-Wuerttemberg Cooperative State University,  
2, Fallenbrunnen, Friedrichshafen, D-88045, Germany.

**The relevance of the study.** The procedures for determining temporary shift, which are widely spread in practice, do not always guarantee the accuracy in defining static corrections. The arising errors lead to a distortion of kinematic parameters of the reflected waves. This affects adversely all subsequent constructions. Therefore, development of the effective method for determining the temporary shift is the relevant issue. The prospects of increasing the reliability of designing the structures, prepared for oil and gas exploration, are related to the successful solution of the problem.

**The aim** of the study is to develop and explore the reliability of the algorithm for determining the temporary shifts between seismic traces based on the optimal and suboptimal processing of phase-frequency characteristics of the reflected waves recorded when searching for oil and gas fields.

**The methods** used in the study: statistical synthesis and analysis of optimal decision rules, digital signal processing, 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 obtaining the effective estimates of temporary shifts between traces. Based on the theory of statistical solutions the optimal algorithm for determining the temporary shifts by the instantaneous mutual phase spectra was built. For practical implementation of the algorithm, the authors proposed a transition from optimal to suboptimal processing of the components of the instantaneous mutual phase spectra by summing the equilibrium. It is shown that the equilibrium processing leads to almost twice reduction of the total signal/noise ratio for practically used strip of frequency. Even such losses allowed obtaining rather reliable estimates of temporary shifts at the intense irregular interference and symmetric distributions of temporary shifts with large dispersion.

### Key words:

Seismic waves, static corrections, function of mutual correlation, mutual phase ranges, phase-frequency tracing.

### REFERENCES

1. Kozyrev V.S., Korotkov I.P., Zhukov A.P. Method of accounting complicated constructed top part of a section in Western Siberia. *Tekhnologii seismorazvedki*, 2014, vol. 3, pp. 66–78. In Rus.
2. Kearey Ph., Brooks M., Hill I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3<sup>rd</sup> ed. US, Wiley-Blackwell, 2002. 272 p.
3. Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A. Estimation and correction of near-surface time anomalies. *Geophysics*, 1974, vol. 39, pp. 441–463.
4. Douma H., Haney M. Surface-wave inversion for nearsurface shear-wave velocity estimation at Coronation field. *81st SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*. San Antonio, 2011. pp. 1411–1415.
5. Adamovich O., Epov K., Korotkov I., Veecken P.C.H. Finite Difference Modeling to Evaluate Acquisition and Processing Parameters on Resolution of Land Seismics. *72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC*. Barcelona, 2010. DOI: 10.3997/2214-4609.201401101.
6. Korotkov I., Veecken P.C.H., Kozyrev V. Interactive Static Corrections to Avoid Mis-interpretation of Seismic Data Due to Near-surface Velocity Changes. *72<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2010*. Barcelona, 2010. DOI: 10.3997/2214-4609.201401294.
7. Yanovskiy A.K. Ispolzovanie funktsiy vzaimnoy korrelyatsii seysmicheskikh trass dlya uvyazki seysmicheskikh nablyudeniy [Use of functions of mutual correlation of seismic routes for coordination of seismic supervision]. *Diskretnaya korrelyatsiya seysmicheskikh voln* [Discrete correlation of seismic waves]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1971. pp. 50–72.
8. Kozyrev V., Zhukov A.I., Korotkov I., Zhukov A.R. An interactive solution for resolving mid-wavelength statics anomalies. *The Leading Edge*, 2004, vol. 23, no. 3, pp. 270–274.



9. Salishchev M.V., Sysoev A.P. Specification of correction model of statistical amendments. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2014, vol. 3, pp. 61–65. In Rus.
10. Shaun Strong, Steve Hearn. Statics correction methods for 3D converted-wave (PS) seismic reflection. *Exploration Geophysics*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1071/EG15115> (accepted: 5 March 2016).
11. Khudyakov G.I. O potentsialnoy tochnosti opredeleniya vremennogo polozheniya fluktuiruyushchikh signalov [About the potential accuracy of defining provisional regulations of fluctuating signals]. *Voprosy radioelektroniki. Seriy: Obshchie voprosy radioelektroniki*, 1984, no. 8, pp. 55–60.
12. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I. Opredelenie vremennogo polozheniya seysmicheskikh signalov po otsenkam ikh fazochastotnykh kharakteristik [Determination of temporal position of seismic signals to measure their phase response]. *Russian Geology and Geophysics*, 1988, vol. 9, pp. 77–83.
13. 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, vol. 342, pp. 27–36.
14. Zenov A.A. Vychislenie optimalnogo vremennogo sdviga mezhd seysmicheskimi trassami [Calculation of optimum temporary shift between seismic routes]. *Razvedochnay geofizika*, 1977, no. 76, pp. 18–21.
15. Dankvardt E., Pattser U. Problemy ispolzovaniy fazovykh spektrov seysmicheskikh dannyykh [Problems of using phase spectra of seismic data]. *Trudy 30 Mezhdunarodnogo geograficheskogo simpoziuma* [Proc. of the 30 International geographical symposium]. Moscow, 1985. No. 2, pp. 132–142.
16. Mitrofanov G.M. Obrabotka fazovykh spektrov mnogokanalnykh seysmogramm [Processing of phase ranges of multichannel seismographic records]. *Russian Geology and Geophysics*, 1986, vol. 10, pp. 99–109.
17. Kanygin M.Yu., Petrova N.V. Soglasovanie fazovykh spektrov signalov pri formirovani obobshchennykh seysmicheskikh proektov [Coordination of signal phase ranges when forming generalized seismic projects]. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2009, vol. 1, pp. 56–59. In Rus.
18. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Kupina N.A., Orlov O.V. Phase/frequency picking of reflection events: method and application to cmp data processing. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2013, vol. 3, pp. 5–10. In Rus.
19. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Orlov O.V. Application of the phase-frequency analysis methods of seismic waves to study borehole environment. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, vol. 10, pp. 58–63. In Rus.
20. Goldin S.V. K teorii spektralno-statisticheskogo metoda obrabotki seysmogramm [To the theory of a spectral and statistical method of processing seismographic records]. *Russian Geology and Geophysics*, 1976, vol. 1, pp. 138–149.
21. *Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov v radionavigatsionnykh sistemakh* [Search, detection and measurement of parameters of signals in radio navigational systems]. Ed. by Yu.M. Kazarinov. Moscow, Sov. Radio Publ., 1975. 296 p.
22. Hezo A., Schwatz S. Alternatives cross correlation for time delay estimation. *ICA SSP 84; IEEE Int. conf. Acoustics, Speech, and Signal Process.* San Diego, Calif., 1984. Vol. 1, pp. 15.411–15.414.
23. Miller L.E., Lee J.S. Error analysis of time delay estimation using a finite integration time correlator. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981. Vol. 29, pp. 490–496.

*Received: 26 April 2016.*

#### 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.

**Elena V. Zlobina**, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Viktor Geringer**, Dr. Sc., Head of the Laboratories, Baden-Wuerttemberg Cooperative State University.

УДК 536.331

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ СВЕРХТОНКИХ ЖИДКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

**Анисимов Максим Васильевич<sup>1</sup>,**  
teploproekt@list.ru

**Лычагин Дмитрий Васильевич<sup>2</sup>,**  
dmitrylychagin@mail2000.ru

**Рекунов Виталий Сергеевич<sup>1</sup>,**  
Rekunovvs@mail.ru

**Таалайбеков Жаныбек Таалайбекович<sup>1</sup>,**  
jtaalaibekov@mail.ru

<sup>1</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
Россия, 634003, Томск, пл. Соляная, 2.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность работы** обусловлена современными мировыми тенденциями в области политики энерго- и ресурсосбережения, которые влекут за собой необходимость более экономного использования георесурсов Земли, в том числе в области строительства. Применение современных утепляющих материалов позволит во многом решить проблему рационального использования полезных ископаемых Земли. Оценка применимости различных современных теплоизолирующих покрытий представляет собой актуальную задачу, которая влечет за собой необходимость экспериментальной проверки значений интегральной степени черноты сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий и выявления их истинных значений.

**Цель исследования:** разработка метода измерений и лабораторной исследовательской установки и проведение эксперимента по определению значений степени черноты сверхтонких жидких композиционных покрытий разработанным методом.

**Методы исследования:** эмпирическое определение степени черноты покрытия с использованием предложенного лабораторного устройства, включающего в себя: систему «серых» тел, датчиков термопар и источника стационарного теплового потока.

**Результаты.** Экспериментально определена интегральная степень черноты сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий. Она составила для «Образца № 1»  $\varepsilon=0,89$ , для «Образца № 2»  $\varepsilon=0,87$  в измеряемых температурных границах 35–65 °С. Выполнен расчет погрешности измерений. Реальная степень черноты исследуемых образцов оказалась выше заявленной. Несмотря на это, подобные жидкие теплоизоляционные покрытия представляют большой интерес для строителей, т. к. позволяют утеплять объекты сложной геометрической формы (корпуса задвижек, сложные узлы и т. п.), что в ряде случаев делает их практически незаменимыми. Правильный учет теплотехнических качеств красок позволит избежать сверхнормативных увеличений тепловых потерь изолированных трубопроводов с теплоносителем или строительных ограждающих конструкций, а также защитит их от возможного размораживания в период отрицательных температур.

### **Ключевые слова:**

Эксперимент, тепловое излучение, интегральная степень черноты, теплоизоляция, жидкие сверхтонкие покрытия.

### **Анализ проблемы**

Современные мировые тенденции в области политики энерго- и ресурсосбережения требуют от различных материалоемких производств (в том числе строительной отрасли) экономного использования георесурсов. Использование современных утепляющих материалов позволит во многом решить проблему рационального применения полезных ископаемых Земли.

На сегодняшний день в строительной отрасли используется большое количество всевозможных теплоизоляционных материалов. Среди них встречаются хорошо себя зарекомендовавшие, например минераловатные утеплители, пенополиуретановые, пенополистирольные, из вспененного полиэтилена и многие др.

Сравнительно недавно на рынке появились сверхтонкие жидкие композиционные теплоизо-

лирующие покрытия (далее – теплоизолирующие краски) нового поколения (например, mascoat, tsmceramic, thermalcoat, Изоллат, Астратек, Альфатек, Теплокотт, Корунд и т. п.), предназначенные для тепловой изоляции фасадов здания и строительных конструкций, а также трубопроводов с теплоносителем.

По мнению производителей данных красок, они обладают исключительными теплоизолирующими качествами (например, коэффициент теплопроводности представленных материалов находится на уровне  $\lambda=0,001...0,002$  Вт/(м·°С)). В качестве сравнительного примера часто приводятся данные о том, что слой такой краски, толщиной от 1 до 3 мм, нанесенный на инженерные трубопроводы, может с успехом заменить изоляцию толщиной в несколько сантиметров широко известных минераловатных утеплителей [1–4]. Вместе с тем рабо-

ты некоторых авторов [5, 6] убедительно доказывают, что реальные значения теплопроводности и степени черноты указанных материалов существенно расходятся с паспортными данными производителей. Проведенные исследования в 2015 г. [7, 8] показали, что у двух выбранных жидких теплоизолирующих красок известных марок заявленный коэффициент теплопроводности не подтвердился.

Кроме того, производители часто приводят данные об особых теплоотражающих свойствах теплоизолирующих красок, благодаря которым емкость, покрытая указанными материалами, приобретает свойства термоса, что увеличивает общие теплоизолирующие свойства таких красок.

Как известно, высокими теплоотражающими свойствами обладает алюминий (интегральная степень черноты  $\varepsilon=0,03-0,05$ ), медь ( $\varepsilon=0,02-0,07$ ) и ряд других металлов. На принципе отражения теплового излучения основаны теплоизолирующие свойства таких утеплителей, как например Армофол, Экофол, Порилекс, Пенофол и др., которые имеют слой вспененного полиэтилена, покрытого тонким слоем алюминия. Предлагаемые теплоизолирующие краски таких покрытий не имеют, а, по мнению самих производителей, отражают инфракрасное излучение за счет использования газозаполненных или вакуумозаполненных микросфер, входящих в состав таких покрытий.

Подобные заявления производителей жидких теплоизолирующих покрытий в ряде случаев противоречат существующей теории теплообмена, т. к. изготовители не приводят теоретического обоснования тепловых эффектов, которые привели бы к такому результату, или они неоднозначны. На сегодняшний день исследования различных специалистов в этой области зачастую дают противоречивую информацию [1–6].

Следует отметить, что неправильный учет реальных теплоизоляционных качеств строительным материалов может привести к сверхнормативному увеличению тепловых потерь теплоизолированных трубопроводов с теплоносителем или строительных ограждающих конструкций. Кроме того, в ряде случаев это может привести к их возможному размораживанию в период отрицательных температур и прочим проблемам. Последующая замена жидких теплоизоляционных материалов на классические приведет к необоснованному перерасходу материалов, что противоречит энергосберегающей политике нашего государства, тем более что указанные теплоизолирующие краски имеют высокую цену.

Экспериментальное определение интегральной степени черноты как основного показателя способности тела отражать тепловое излучение для современных жидких теплоизолирующих покрытий в данном контексте является актуальной задачей. В связи с этим было принято решение о проведении экспериментального определения интегральной

степени черноты некоторых жидких теплоизолирующих покрытий с целью выявления их истинного значения.

#### Обзор существующих методов определения интегральной степени черноты материалов и постановка физической схемы ее вычисления

При планировании эксперимента по определению интегральной степени черноты жидких утепляющих покрытий был проведен обзор существующих методов [9–16] по заявленной теме исследований.

Так, например, в запатентованном методе измерений [9]  $\varepsilon$  вычисляется по зависимости

$$\varepsilon = 1 - \frac{P_m - P_o}{S\varepsilon_s\sigma(T_s^4 - T_c^4)}, \quad (1)$$

где  $P_m, P_o$  – мощности источника тепловыделений, затрачиваемые на нагрев эталонного и исследуемого образцов до стационарного значения температуры  $T_s, K$ ;  $T_c$  – температура среды,  $K$ ;  $\sigma=5,67\cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K}^4)$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $S$  – теплоотдающая площадь поверхности образца,  $\text{м}^2$ ;  $\varepsilon_s$  – степень черноты поверхности эталонного образца.

Измерения степени черноты покрытий и свободных поверхностей твердых тел по методу [9] проводят последовательно с измерением температуры эталонного и исследуемого образцов, изготавливаемых из одного материала с нанесенным на эталонный образец покрытием с известной степенью черноты.

Причем образцы, изготовленные в виде двух одинаковых пластин с одинаковыми покрытиями, размещают параллельно один напротив другого покрытиями наружу, в полость между ними помещают электронагреватель. Далее устанавливают в воздушную среду, последовательно нагревают при постоянной мощности нагревателя до полного установления стационарного теплового режима, а степень черноты исследуемой поверхности определяют по приведенной формуле (1), что обеспечивает упрощение и повышение точности измерений степени черноты поверхности твердых тел.

В соответствии с алгоритмом предлагаемого способа [9] для проведения измерений степени черноты поверхностей берут образцы из требуемого материала, на который наносят контрольное и исследуемое покрытия. Форма образца – круглая пластинка толщиной, например, около 1 мм. Первыми в устройство устанавливают образцы с покрытием, имеющим известную степень черноты, желательнее, чтобы контрольный образец имел степень черноты, близкую к единице, это позволяет получить наибольшую величину разности мощностей тепловыделений в обоих измерениях.

Также известен способ и устройство для определения теплофизических характеристик тонкослойных материалов [10]. Сущность метода заключается в том, что осуществляется предварительный нагрев до заданной температуры модели абсо-

лотно черного тела, образованного двумя идентичными, параллельно расположенными плоскими образцами совместно с боковыми и внутренними секционированными экранами, путем пропускания через образцы одинаковых электрических токов. После этого измеряют силу тока и падения напряжения в центральной зоне каждого из образцов, температуру внешней поверхности одного образца и внутренней поверхности второго образца. Далее производят импульсное тепловое воздействие на внешнюю поверхность одного из образцов, одновременно регистрируя температуру противоположной поверхности этого же образца, и, используя эти данные, рассчитывают набор искомым теплофизических характеристик – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, удельную теплоемкость, спектральную и интегральную степень черноты, удельное электросопротивление.

К недостаткам данного метода следует отнести сложность способа и устройства, ограничения на геометрию образцов, исследуемых с применением данного способа, а также трудности обеспечения малой погрешности измерений при регистрации нестационарных температур и последующем вычислении совокупности исследуемых параметров.

Известен другой способ определения степени черноты твердых тел [11]: образец в форме прямоугольного параллелепипеда нагревают электрическим током, измеряют мощность, выделяемую в стационарном тепловом режиме в осевом направлении участка образца. Измеряют температуры на поверхности параллелепипеда в серединах двух взаимно перпендикулярных граней и на расстоянии от его ребра, равном радиусу площадки визирования оптического пирометра, и по измеренным параметрам рассчитывают теплофизические характеристики.

Недостатком данного способа является то, что для обеспечения заданной точности измерений требуется точное и дорогостоящее оборудование для измерения величины лучистого теплового потока. Кроме того, имеются ограничения, связанные с необходимостью помещения образца в вакуумную камеру, а в случае ее отсутствия – с необходимостью учета тепловой мощности, отводимой конвекцией, что повышает погрешность измерений.

Кроме указанных методов существует способ измерения степени черноты твердых тел [12], при котором измеряют температуры и скорости изменения температуры эталонного и исследуемого образцов, причем эталонный образец изготавливают из того же материала, что и исследуемый образец. При этом на эталонный образец наносят покрытие с известной степенью черноты, сравнивают скорости изменения температуры эталонного и исследуемого образцов при их нагреве излучением черного тела в моменты времени, соответствующие одинаковой температуре, и определяют степень черноты по формуле

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_1}{\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1$  – степень черноты исследуемого образца;  $\varepsilon_2$  – степень черноты эталонного образца;  $\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_1$  и

$\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_2$  – скорость изменения температуры исследуемого образца и эталонного образца при температуре, равной  $T$ .

Данный известный способ позволяет при наличии двух одинаковых образцов твердого тела, один из которых имеет покрытие с известной степенью черноты, при нагреве обоих образцов излучением абсолютно черного тела путем сравнения скоростей изменения температуры получать искомый параметр.

Недостатком указанного способа является необходимость замера скорости изменения температуры образцов в строго фиксированные моменты времени, когда температуры обоих образцов одинаковы. Кроме того, измерение скорости изменения обоих образцов требует дополнительного оборудования. Получение зависимости степени черноты твердого тела от температуры с помощью этого способа не обеспечивает постоянство точности параметра во всем диапазоне измерений, поскольку скорости изменения температуры образцов зависят от температуры.

Кроме вышеперечисленных методов существует ряд способов, которые подразумевают использование оптических приборов.

Известны способы определения теплофизических характеристик материалов, среди которых определение степени черноты поверхности, основанное на калометрическом методе с применением одного или нескольких контактных средств измерения температуры поверхности [13–15]. Как правило, все они имеют общие недостатки, такие как: потери теплоты от контакта датчиков температуры с поверхностью образца, нарушения структуры материала поверхности, а также высокая погрешность датчиков из-за большого числа измерительных элементов.

Существуют способы определения теплофизических характеристик с применением дистанционных приборов – пирометров (тепловизоров) [16]. При реализации таких способов осуществляется нагрев исследуемого образца и регистрируется инфракрасное (ИК) поле, образованное на различных сторонах образца. Для наведения оптической системы тепловизоров на образец применяют поворотные зеркала. Приборы измерения располагаются на различных расстояниях от зеркал. По данным измерений параметров ИК-поля производят

расчет теплофизических характеристик. Таким решениям аналогов присущи недостатки, связанные с влиянием на показания приборов прямого и отраженного излучений фона, а также искажения показаний под влиянием конвективного теплообмена, хотя по [10] нагрев самого образца термостатирован. Фактически эти решения основаны на регистрации суммарного ИК-излучения, поэтому данные имеют завышенные значения.

Существует способ, описанный в руководстве эксплуатации стационарного ИК-пирометра с цифровой обработкой сигнала «Термоскоп-200». Способ основан на измерении радиационной температуры от поверхности исследуемого образца материала, на который нанесен слой покрытия (краска, изоляция) с известным значением показателя степени черноты поверхности  $\varepsilon$ , и от участка без покрытия. Сначала прибор направляют на участок с покрытием, а затем на участок образца без покрытия. Путем варьирования величины  $\varepsilon$  добиваются совпадения значений радиационной температуры. Значение  $\varepsilon$ , соответствующее этому условию, принимается за искомое.

Для реализации такого способа использовано устройство, содержащее оптическую систему приема ИК-излучения в спектральном диапазоне 8...14 мкм с возможностью варьирования значений  $\varepsilon$ , регулировочное устройство, юстировочное устройство для наведения на малоразмерные предметы и систему защиты от отраженного ИК-излучения в виде кожуха с трубой из металла.

Для регулировочного устройства необходимо дополнительное приспособление для крепления, юстировочное рекомендовано к применению для образцов с температурой более 600 °С. Защита от отраженного ИК-излучения эффективна при длине трассы излучения 250 мм. При меньших расстояниях система должна эксплуатироваться без кожуха, а при большей длине трассы остается влияние вредного излучения фона. Кроме того, металлический кожух подвержен влиянию нагрева от окружающих тел и конвективных процессов окружающего фона. В прототипе приходится производить наклон оптической системы и менять угол визирования, вследствие чего меняются параметры сигнала (полезная и отраженная составляющие), а также соотношение площади разрешения оптической системы и полезной площади образца. Это может быть причиной неоднозначности показаний при сопоставлении измерений участков с покрытием и без покрытия. Отсутствуют обоснования применимости способа для условий слабо нагретых тел (в диапазоне естественных изменений температуры), что позволяет предполагать наличие широкого спектра составляющих всего спектрального диапазона и, следовательно, погрешности при выборе конечной величины радиационной температуры. Кроме того, измерения осуществляют для территориально разнесенных участков образца, которые могут иметь различные свойства,

характерные для композитных материалов и тонкопленочных покрытий.

Кроме того, были рассмотрены работы зарубежных [17–27] и российских авторов [28, 29], которые проводили исследования по схожим вопросам.

При анализе существующих методов экспериментального определения интегральной степени черноты различных материалов были сделаны следующие выводы:

1. Как правило, указанные методы сложны и требуют большого количества дорогостоящего оборудования либо наличия вакуума в системе.
2. Ряд методов не рассчитан на исследование  $\varepsilon$  для сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий.
3. Температурный режим при нагревании по ряду методов может вызвать внутреннюю деформацию или тепловое разрушение теплоизолирующих красок, так как они не рассчитаны на работу в температурных условиях выше 200 °С, а также изменения их теплофизических свойств.
4. Имеются ограничения на геометрию образцов.
5. Требуется учет количества теплоты с высокой точностью, затрачиваемой на нагрев исследуемых образцов.

По результатам проведенного анализа имеющихся методов исследований было принято решение о разработке собственного алгоритма вычисления  $\varepsilon$  для указанных утепляющих покрытий, который позволил бы проводить измерения с удовлетворительной точностью с учетом особенностей физических свойств образцов.

Как известно, из закона Стефана–Больцмана следует выражение для расчета плотности потока собственного излучения (лучеиспускательной способности) серого тела:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon \sigma_0 T^4 = \varepsilon c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 = c \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (3)$$

где  $c = \varepsilon c_0$  – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>);  $T$  – температура тела, К.

Для случая, когда имеет место теплообмен излучением в замкнутой системе, состоящей из двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой (рис. 1) тепловой поток результирующего излучения рассчитывают по формулам:

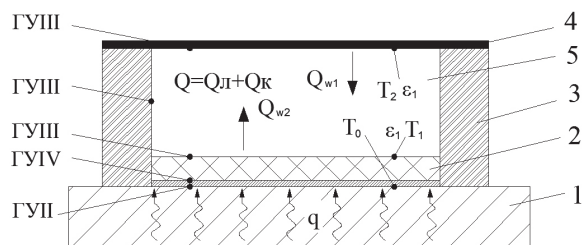
$$\begin{aligned} Q_{w,1} &= \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4) \varphi_{21} F_2, \\ Q_{w,2} &= \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} F_1 \end{aligned} \quad (4)$$

или

$$\begin{aligned} Q_{w,1} &= c_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \varphi_{21} F_2, \\ Q_{w,2} &= c_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} F_1, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты в системе двух тел;  $T_1$  и  $T_2$ ,  $F_1$  и  $F_2$  – абсолютные температу-

ры и площади поверхностей теплообмена первого и второго тела;  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{21}$  – угловые коэффициенты излучения, которые показывают, какая доля энергии полусферического излучения попадает с одного тела на другое.



**Рис. 1.** Предлагаемая схема измерений: 1 – источник стационарного теплового потока; 2 – слой исследуемого покрытия, нанесенного на медную пластину, с известной толщиной и коэффициентом теплопроводности; 3 – теплоизолятор (пенопласт); 4 – слой материала с известной степенью черноты; 5 – диатермичная среда (воздух)

**Fig. 1.** Proposed measurement scheme: 1 is the source of steady heat flow; 2 is the layer of the coating, applied on a copper plate, with the known thickness and thermal conductivity coefficient; 3 is the insulator (polystyrene); 4 is the layer of material with a certain emissivity factor; 5 is the diathermancy environment (air)

Для замкнутой системы (рис. 1) из закона сохранения энергии следует равенство:

$$Q_{w,2} = -Q_{w,1}. \quad (5)$$

С учетом того, что источник теплоты (1, рис. 1) находится в стационарном режиме и между слоем медной пластины с нанесенным утепляющим слоем краски формируются граничные условия 2-го рода (ГУ II), то вычисление удельного теплового потока в представленной системе можно выполнить по зависимости

$$q_u = \frac{\Delta T_u}{\frac{d_u}{\lambda_{effu}} - 2R_L}, \quad (6)$$

где  $d_u$  – толщина образца в процессе испытания, м;  $\Delta T_u$  – разность температур на поверхности медной пластины и испытуемого образца, °С ( $\Delta T_u = T_0 - T_1$ );  $R_L$  – термическое сопротивление медной пластины с нанесенным на нее образцом краски, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Такая замена является корректной и не противоречит теории исследования тепловых процессов [28].

Так как на границе раздела слоя медной пластины и нанесенной краски слой воздуха отсутствует, то принимаем граничные условия 4-го рода (ГУ IV). Считаем, что вся теплота переходит в слой краски.

На границах поверхностей покрытия, эталонного материала и теплоизолятора приняты граничные условия 3-го рода (ГУ III). В таком случае тепловой поток от покрытия к эталонному образцу будет являться суммой теплоты, переданной конвекцией, и теплоты, переданной за счет излучения

$Q_{w,2} = Q_{к} + Q_{д}$ . Так как система тел (рис. 1) является замкнутой, то считаем, что конвекция за счет «боковых», горизонтальных движений воздуха отсутствует. При свободной конвекции значение коэффициента конвективной теплоотдачи (для расчета соответствующего количества теплоты  $Q_{к}$ ) может быть вычислен через критерий Нуссельта  $Nu$ .

Кроме того, считаем, что весь тепловой поток поступает с образца 2 на эталонный материал 4 (рис. 1) и площади указанных объектов равны.

С учетом сделанных допущений приведенная степень черноты в системе тел будет рассчитываться по зависимостям:

$$\varepsilon_{np} = \frac{q}{\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)},$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}, \quad (7)$$

$\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – интегральные степени черноты первого и второго тела.

Следовательно, интегральная степень черноты теплоизолирующей краски будет рассчитываться по выражению

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{np}} - \frac{1}{\varepsilon_2} + 1}. \quad (8)$$

Недостатком данного метода может являться необходимость располагать для проведения эксперимента коэффициентом теплопроводности слоя исследуемой теплоизолирующей краски.

#### Порядок эксперимента

Для проведения эксперимента авторами был рассмотрен перечень наиболее известных фирм-производителей жидких теплоизолирующих покрытий.

На строительном рынке России можно встретить достаточно большое количество жидких теплоизоляционных покрытий (например, mascoat, tsmceramic, thermalcoat, Изоллат, Астратек, Альфатек, Теплокотт, Корунд и т. п.).

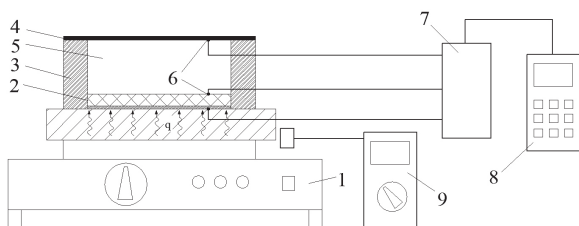
Для исследований были выбраны два образца жидких утеплителей – Изоллат и Теплометт (далее – Образец № 1 и Образец № 2). Некоторые характеристики образцов приведены в таблице.

Производители теплоизоляционных красок зачастую не предоставляют полную информацию о физико-химическом составе производимых ими теплоизолирующих покрытий, поэтому данные о составе теплоизолирующих красок исследуемых образцов были получены с официальных сайтов заводов-изготовителей. В состав красок входят: микросферы стеклокерамические, связующие, диспергаторы, наполнители, пигменты, разбавители. Как правило, поставщики не приводят процентного соотношения ингредиентов.

**Таблица.** Некоторые заявленные характеристики экспериментальных образцов

**Table.** Specifications of the experimental samples

Наименование характеристики Characteristic	Ед. измерения Unit	Образец Sample	
		№ 1	№ 2
Цвет покрытия Coat color		Белый/White	
Теплопроводность Heat conductivity	Вт/(м·°C) W/(m·°C)	0,0011	0,002–0,007
Плотность Density	кг/м³/kg/m³	390	280
Паропроницаемость Vapor permeability	мг/(м·ч·Па) mg/(m·h·Pa)	0,012	
Водопроницаемость Water conductivity	кг/(ч·м·0,1 атм) kg/(h·m·0,1 atm)	менее 30 less than 30	
Тепловосприятие Heat absorption	Вт/м·°C W/m·°C	1,78	
Теплоотдача Heat transfer		1,58	
Блеск покрытия Coating shine	%	7,4	7,1



**Рис. 2.** Принципиальная схема измерительного комплекса: 1 – источник стационарного теплового потока; 2 – слой исследуемого покрытия, нанесенного на медную пластину, с известной толщиной и коэффициентом теплопроводности; 3 – теплоизолятор (пенопласт); 4 – слой материала с известной степенью черноты; 5 – диатермичная среда (воздух); 6 – термопары между слоями; 7 – коммутатор; 8 – прибор измерения «Терем-4.0»; 9 – радиометр неселективный «АРГУС-03» (показан условно)

**Fig. 2.** Diagram of the measuring system: 1 is the source of steady heat flow; 2 is the layer of the coating, applied on a copper plate, with the known thickness and thermal conductivity coefficient; 3 is the insulator (polystyrene); 4 is the layer of material with a certain emissivity factor; 5 is the diathermancy environment (air); 6 are the thermocouples between the layers; 7 is the switching device; 8 is the measuring device «Terem-4.0»; 9 is the nonselective radiometer «ARGUS-03» (shown schematically)

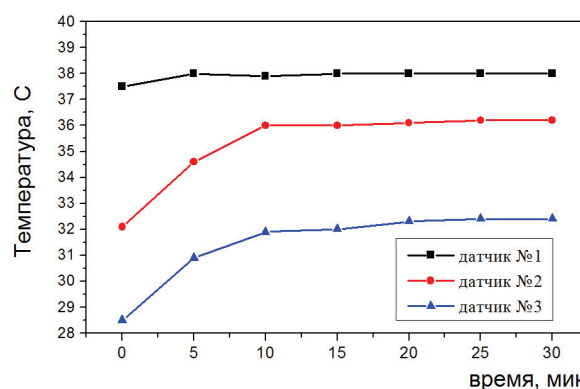
Для проведения эксперимента был разработан измерительный комплекс, который включал в себя:

1. Устройство для тестирования образцов (рис. 2).
2. Прибор марки «Терем-4.0» для измерения показаний от термопар.
3. Термопары «хромель-копелевые», изготовленные из проводов толщиной  $\delta=0,2$  мм.
4. Пластина из материала с известной степенью черноты (картон черного цвета,  $\varepsilon=0,945$ ).
5. Радиометр неселективный «АРГУС-03» (имеющий относительную погрешность до 5 %), который предназначен для уточнения количества

теплоты, излучаемой с поверхности исследуемого материала.

Значения коэффициентов теплопроводности образцов теплоизолирующих покрытий были определены заранее [7, 8]. Теплопроводность медной пластины толщиной  $\delta=0,5$  мм равна:  $\lambda=384$  Вт/(м·°C). Температура воздуха в помещении при проведении эксперимента была равна 24 °C, относительная влажность воздуха  $\varphi=48$  %.

Для стабилизации показаний прибора в процессе его «прогрева» и перевода теплового потока в стационарный режим (выравнивания тепловых потоков) были проведены контрольные замеры динамики показаний прибора по 3-м датчикам термомпар в течение 0,5 часа с шагом проведения измерения 5 мин (рис. 3).



**Рис. 3.** Показания прибора по данным от 3-х датчиков термомпар по времени

**Fig. 3.** Readings of the unit according to the data of three thermocouple detectors by time

Из представленного графика видно, что показания прибора выходили на стационарный уровень через 20 мин после начала его работы, что было учтено при проведении экспериментов.

Для проверки адекватности разработанного устройства для измерения интегральной степени черноты теплоизолирующих красок вначале были произведены поверочные работы. При вычислении теплового потока с поверхности исследуемого покрытия на него помещался датчик радиометра, который показывал излучаемый тепловой поток. Расхождение при этом не превышало 5 %

Полученные данные свидетельствуют, что погрешность по данному методу не превышает допустимой погрешности, что говорит о корректности выбранной схемы исследований.

#### Анализ результатов эксперимента

Для анализа динамики изменения интегральной степени черноты в зависимости от температуры образцов краски Образец № 1 и Образец № 2 тестировались в разных температурных режимах при различном тепловом потоке. Полученные результаты представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4, средняя величина степени черноты с увеличением температуры образца краски также увели-

чивается. Данное наблюдение удовлетворительно согласуется с аналогичными результатами, представленными в [28, 29].

Как показал эксперимент, у Образца № 1 средняя степень черноты  $\varepsilon=0,89$ , у Образца № 2  $\varepsilon=0,87$  в пределах температур 35...65 °С. Дальнейшее увеличение температуры нецелесообразно, так как исследуемые образцы были предназначены для окрашивания трубопроводов систем отопления, где температурный режим эксплуатации ограничен 100 °С. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными другими авторами [6].

Расчет погрешности измерений проводился по зависимостям (4)–(6).

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}, \quad (9)$$

где  $A$  – измеряемая величина;  $\bar{A}$  – среднее значение измеряемой величины;  $\Delta\bar{A}$  – абсолютная погрешность среднего значения измеряемой величины, определяемая по формуле

$$\Delta\bar{A} = t_{y,n-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}}, \quad (10)$$

где  $t_{y,n-1}$  – коэффициент Стьюдента (при  $t_{95\%,22}=2,074$ ).

Относительная погрешность среднего значения измеряемой величины рассчитывается по зависимости

$$\varepsilon = \frac{\Delta\bar{A}}{\bar{A}}. \quad (11)$$

Погрешность измерения составила:  $\varepsilon=0,01\%$ .

Итоговая погрешность определения теплопроводности с учетом погрешности прибора измерения тепловых потоков (5%), измерения датчиками термопар с помощью прибора «Терем 4.0» (1%) составила 6,01%.

#### Заключение

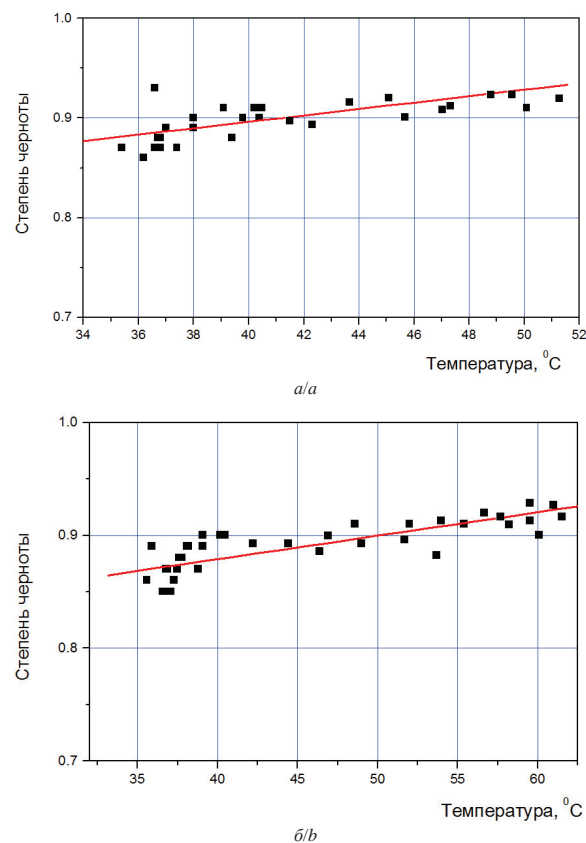
В результате проделанной работы была экспериментально определена интегральная степень черноты ( $\varepsilon$ ) сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий. Для Образца № 1  $\varepsilon=0,89$ , для Образца № 2  $\varepsilon=0,87$  в пределах температур 35...65 °С. Сравнивая полученные результаты с имеющимися данными, можно сделать вывод, что степень черноты исследуемых материалов сопоставима по своим показателям, например, с асбестовой бумагой ( $\varepsilon=0,93$ ) или гипсом ( $\varepsilon=0,9$ ). Также полученная степень черноты весьма близка, например, к лаку белому эмалевому, нанесенному на металлический лист ( $\varepsilon=0,906$ ). Вместе с тем утверждения производителей утепляющих покрытий о высокой отражающей способности этих

материалов являются на данный момент преждевременными.

Авторы статьи допускают, что расхождение между экспериментальными характеристиками и заявленными возможно вследствие того, что в качестве образцов для исследований были выбраны краски с наполнением газозаполненными микросферами, а не вакуумозаполненными (некоторые производители указывают на это различие), так как их теплофизические свойства будут не одинаковы.

Несмотря на это, подобные жидкие теплоизоляционные покрытия представляют собой большой интерес для строителей, так как позволяют утеплять объекты сложной геометрической формы (корпуса задвижек, сложные узлы и т. п.), что в ряде случаев делает их практически незаменимыми.

Данное исследование не претендует на роль «окончательного» и скорее направлено на предпосылки к дальнейшему изучению теплоизоляционных свойств современных жидких композиционных теплоизолирующих покрытий, так как их теплофизические свойства на сегодняшний день еще недостаточно изучены.



**Рис. 4.** Результаты эксперимента по определению степени черноты образцов краски: а) Образец № 1; б) Образец № 2

**Fig. 4.** Results of the experiment on determining paint sample emissivity factor: a) sample no. 1; b) sample no. 2



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальное определение коэффициентов теплопроводности и эффективности сверхтонких теплоизоляционных покрытий / И.О. Манешев, Ю.И. Правник, Р.А. Садыков, И.А. Сафин, С.А. Еремин // Известия КазГАСУ. – 2014. – № 1 (23). – С. 135–142.
2. Барболина М.С., Павлов М.В. Определение коэффициента теплопроводности жидкой тепловой изоляции при нестационарном тепловом режиме // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК». – 2016. – № 3 (39). URL: <http://sibac.info/studentconf/tech/xl/48955> (дата обращения: 15.04.2016).
3. Сверхтонкая теплоизоляция «Броня» // Волгоградский инновационный ресурсный центр. URL: <http://www.nano34.ru> (дата обращения: 19.03.2016).
4. Севастьянова А.А., Квитко Г.В., Иост М.К. Жидкий утеплитель – будущее изоляции // Вопросы науки. – 2014. – Т. 2. – С. 119–122.
5. Ширинян В.Т. Поход жидко-керамического «супертеплоизоляционного» покрытия по тепловым сетям России // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 9. – С. 46–51.
6. О реальных физических свойствах и возможностях «теплоизолирующих» красок / Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Л.И. Воробьев, А.Г. Мазуренко, В.И. Шаповалов // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 5. – С. 93–96.
7. Анисимов М.В., Рекунов В.С. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 15–20.
8. The empirical evaluation of thermal conduction coefficient of some liquid composite heat insulating materials // M.V. Anisimov, V.S. Rekunov, M.N. Babuta, Nguyen T.H.B. Lien // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 012014. – № 5. DOI: 10.1088/1757-899X/116/1/012014.
9. Способ измерения степени черноты: пат. Рос. Федерация № 2510491; заявл. 11.01.2012; опубл. 27.03.2014, Бюл. № 4. – 5 с.
10. Способ и устройство для определения теплофизических характеристик тонкослойных материалов: пат. Рос. Федерация № 2132549; заявл. 14.01.1997; опубл. 25.03.1999, Бюл. № 3. – 10 с.
11. Способ определения теплофизических свойств твердых тел: пат. Рос. Федерация № 1766172; заявл. 14.09.1989; опубл. 09.07.1990, Бюл. № 8. – 7 с.
12. Способ измерения степени черноты твердых тел: пат. Рос. Федерация № 770333; заявл. 19.05.1978; опубл. 31.05.1979, Бюл. № 12. – 15 с.
13. Способ определения теплофизических характеристик пенополиуретанов: пат. Рос. Федерация № 2295720; заявл. 17.02.2005; опубл. 20.03.2007, Бюл. № 14. – 8 с.
14. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов: пат. Рос. Федерация № 2192000; заявл. 04.09.2000; опубл. 27.10.2002, Бюл. № 2. – 7 с.
15. Способ определения теплофизических характеристик материалов и устройство для его реализации: пат. Рос. Федерация № 2096770; заявл. 27.07.1994; опубл. 20.11.1997, Бюл. № 11. – 6 с.
16. Способ определения теплофизических характеристик материалов. Патент РФ № 2224245; заявл. 02.04.2002; опубл. 20.02.2004, Бюл. № 12. – 4 с.
17. Salvaggio C., Miller D.P. Temporal variations in the apparent emissivity of various materials // Proc. of SPIE. – Bellingham, WA, 2004. – V. 5425. DOI: 10.1117/12.546321.
18. Fronapfel E.L., Stolz B.J. Emissivity Measurements of Common Construction Materials // InfraMation. – 2006. – V. 2. – № 11. – P. 22–30.
19. Dewitt D.P., Nutter G.D. Theory and practice of radiation thermometry. – New York: John Wiley & Sons, 1988. – 248 p.
20. Nerry F., Labe J., Stoll M.P. Emissivity signatures in the thermal infrared band for remote sensing: calibration procedure and method of measurement // Applied Optics. – 1988. – V. 27. – P. 758–764.
21. The Spectral Emissivity of Surface Layers currently applied in Blackbody radiations covering the Spectral range from 0,9 to 20 micron – an International comparison / M. Battuello, S. Clausen, J. Hameury, P. Bloembergen // Proc. of TEMPMEKO99. – New York, 1999. – P. 601–606.
22. High emissivity coatings for high temperature application: progress and prospect / Xiaodong He, Yibin Li, Lidong Wang, Yue Sun, Sam Zhang // Thin Solid Films. – 2009. – V. 14. – № 7. – P. 5120–5129.
23. Neuer G., Jaroma-Weiland G. Spectral and Total Emissivity of High-Temperature Materials // International Journal of Thermophysics. – 1998. – V. 19. – № 3. – P. 145–155.
24. Watson K. Two-temperature method for measuring emissivity. – Denver, USA: U.S. Geological Survey, 2003. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90095-2.
25. Le Yuan, Xiaolong Weng, Longjiang Deng. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating // Infrared Physics & Technology. – January 2013. – V. 56. – P. 25–29.
26. Chang-Da Wen, Issam Mudawar. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – V. 47. – Iss. 17–18. – P. 3591–3605.
27. Biassetto L., Manzolaro M., Andrighetto A. Emissivity measurements of opaque gray bodies up to 2000 °C by a dual-frequency pyrometer // Eur. Phys. J. – 2008. – № 14. – P. 167–171.
28. Прошкин С.С. Измерение коэффициента излучения полимерных композитных материалов // Вестник МАХ. – № 3. – 2015. – С. 73–78.
29. Домбровский Л.А. Моделирование теплового излучения полимерного покрытия, содержащего полые микросферы // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43. – № 1. – С. 1–11.

Поступила 15.04.2016 г.

## Информация об авторах

**Анисимов М.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды Томского государственного архитектурно-строительного университета.

**Лычагин Д.В.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры минералогии и геохимии Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Рекунов В.С.**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения Томского государственного архитектурно-строительного университета.

**Таалайбеков Ж.Т.**, студент кафедры охраны труда и окружающей среды Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 536.331

## EXPERIMENTAL DEFINITION OF INTEGRATED EMISSIVITY FACTOR OF ULTRATHIN FLUID COMPOSITE HEAT INSULATING COATINGS

**Maksim V. Anisimov<sup>1</sup>,**

teploproekt@list.ru

**Dmitry V. Lychagin<sup>2</sup>,**

dmitrylychagin@mail2000.ru

**Vitaly S. Rekunov<sup>1</sup>,**

Rekunovs@mail.ru

**Zhanibek T. Taalaybekov<sup>1</sup>,**

jtaalaibekov@mail.ru

<sup>1</sup> Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the contemporary world tendencies in the sphere of energy and resources saving policy that involves the necessity of more rational environmental management including the field of construction. The usage of modern heat insulation materials will allow solving the problem of the rational exploitation of the Earth mineral resources. The evaluation of different modern heat-insulating coats applicability represents the topical problem that involves the necessity to check by experiment the values of the total emissivity of the ultrathin liquid composition heat-insulating coating and detect their true values.

**The aim** of the research is to develop measuring technique and design a laboratory research installation; to carry out the experiment on defining the values of emissivity factor of ultrathin liquid composite coatings by the developed method.

**Research methods:** empirical definition of the coating emissivity factor using the proposed laboratory device, including the system of «grey» bodies, gauges of thermocouples and a source of a stationary thermal stream.

**Results.** The authors have determined by experiment the integrated emissivity factor of ultrathin liquid composite heat insulating coatings. It is  $\varepsilon=0,89$  for «the sample no. 1», and it is  $\varepsilon=0,87$  for the «sample no. 2» within 35–65 °C. The measuring error was calculated. The actual emissivity factor of the studied samples was higher than the declared one. Despite this, similar liquid heat insulating coatings are of great interest to builders as they allow warming objects of complex geometrical shapes (valve chambers, complex assemblies, etc.) and in some cases they become almost irreplaceable. The proper account of paint heating qualities will allow avoiding the above-limit growth of heat loss in isolated pipelines with heat transfer materials or building structures, and protect them from possible thawing in the period of subzero weather.

### Key words:

Experiment, thermal radiation, emissivity factor, heat insulation, liquid ultrathin coatings.

### REFERENCES

- Maneshev I.O., Pravnik Yu.I., Sadykov P.A., Safin I.A., Eremin S.A. Experimental determination of thermal conductivity and thermal insulation efficiency of ultrathin coatings. *News of the KSUAE*, 2013, no. 1 (23), pp. 135–142. In Rus.
- Barbolina M.S., Pavlov M.V. Opredelenie koefitsienta teploprovodnosti zhydkoy teplovy izolyatsii pri nestatsionarnom teplovom rezhime [Determination of thermal conductivity coefficient of liquid thermal insulation at non-stationary thermal regime]. *Nauchoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 3 (39). Available at: URL: <http://sibac.info/stud-conf/tech/xl/48955> (accessed 15 April 2016).
- Sverkhtonkaya teploizolyatsiya «Bronya» [Ultra-thin insulation Bronya]. Available at: <http://www.nano34.ru> (accessed 19 March 2016).
- Sevastyanova A.A., Kvitko G.V., Iost M.K. Zhidkiy uteplitel – buduyushchie izolyatsii [Liquid insulation – insulation of the future]. *Voprosy nauki*, 2015, vol. 2, pp. 119–122.
- Shirinyan V.T. Pokhod zhidko-keramicheskogo «super teplo izolyatsionnogo» pokrytiya po teplovym setyam Rossii [Flow of liquid ceramic «super heat-insulating» coating on the Russian heat networks]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2007, no. 9, pp. 46–51.
- Dekusha L.B., Grishchenko T.G., Vorobyov L.I., Mazurenko A.G., Shapovalov V.I. O realnyh fizicheskikh svoystvakh i vozmozhnostyakh «teploizoliruyushchikh» krasok [On real physical properties and possibilities of «insulating» paints]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2006, vol. 28, no. 5, pp. 93–96.
- Anisimov M.V. Experimental determination of thermal conductivity coefficient of ultrathin liquid composite thermal barrier coatings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 15–20. In Rus.
- Anisimov M.V., Rekunov V.S., Babuta M.N., Nguyen T.H.B. Lien. The empirical evaluation of thermal conduction coefficient of some liquid composite heat insulating materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 012014116, no. 5. DOI: 10.1088/1757-899X/116/1/012014.
- Lapovok E.V., Penkov M.M., Slinchenko D.A., Urtmintsev I.A., Khankov S.I. Sposob izmereniya stepeni chernoty [The way to measure emissivity factor]. Patent RF, no. 2510491, 2014.
- Bronnikov V.A., Volga V.I. Sposob i ustroystvo dlya opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik tonkosloynnykh materialov [Method and device for determining thermophysical characteristics of thin-layer materials]. Patent RF, no. 2132549, 1999.

11. Fokin S.I., Prosuntsev P.V., Sinkevich O.A., Kirillov V.N., Zuev A.V. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh svoystv tverdykh tel* [Method of determining thermophysical properties of solids]. Patent RF, no. 1766172, 1990.
12. Zhigalov V.N., Malkiel Zh.P. *Sposob izmereniya stepeni chernoty tverdykh tel* [A measure of solids emissivity factor]. Patent RF, no. 770333, 1979.
13. Obukhov V.V., Obukhova L.V. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik penopoliiuretanov* [Method of determining thermophysical characteristics of polyurethane foams]. Patent RF, no. 219200, 2007.
14. Klebanov M.G., Obukhov V.V., Fesenko T.A. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik materialov* [Method of nondestructive control of thermophysical characteristics of materials]. Patent RF, no. 2192000, 2002.
15. Boyarinov A.E., Glinkin E.I., Chekulaev D.E., Mishchenko S.V. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik materialov i ustroystvo dlya ego realizatsii* [A method of determining the thermal properties of materials and device for its realization]. Patent RF, no. 2096770, 1997.
16. Vlasov A.B. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik materialov* [Method of determining thermophysical characteristics of materials]. Patent RF, no. 2224245, 2004.
17. Carl S., David P.M. Temporal variations in the apparent emissivity of various materials. *Proceedings of SPIE*. Bellingham, WA, 2004. Vol. 5425. DOI: 10.1117/12.546321.
18. Edward L.F., Bradley J.S. *Emissivity Measurements of Common Construction Materials*. New York, 2006, vol. 2, no. 11, pp. 22–30.
19. Dewitt D.P., Nutter G.D. *Theory and practice of radiation thermometry*. New York, John Wiley & Sons, 1988. 248 p.
20. Nerry F., Labed J., Stoll M.P. Emissivity signatures in the thermal infrared band for remote sensing: calibration procedure and method of measurement. *Applied Optics*, 1988, vol. 27, pp. 758–764.
21. Battuello M., Clausen S., Hameury J., Bloembergen P. The Spectral Emissivity of Surface Layers currently applied in Blackbody radiations covering the Spectral range from 0,9 to 20 micron – an International comparison. *TEMPMEKOr99 Proceedings*. New York, 1999. pp. 601–606.
22. Xiaodong He, Yibin Li, Lidong W., Yue S., Sam Zh. High emissivity coatings for high temperature application: progress and prospect. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 14, no. 7, pp. 5120–5129.
23. Neuer G., Jaroma-Weiland G. Spectral and Total Emissivity of High-Temperature Materials. *International Journal of Thermophysics*, 1998, vol. 19, no. 3, pp. 145–155.
24. Watson K. *Two-temperature method for measuring emissivity*. Denver, USA, U.S. Geological Survey, 2003. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90095-2.
25. Le Y., Xiaolong W., Longjiang D. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating. *Infrared Physics & Technology*, 2013, vol. 56, pp. 25–29.
26. Chang-Da W., Issam M. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, pp. 3591–3605.
27. Biasetto L., Manzolaro M., Andrighetto A. Emissivity measurements of opaque gray bodies up to 2000 °C by a dual-frequency pyrometer. *Eur. Phys. J.* 2008, vol. 38, no. 14, pp. 167–171.
28. Proshkin S.S. Izmerenie koeffitsienta izlucheniya polimernykh kompozitnykh materialov [Measurement of emissivity of polymer composite materials]. *Vestnik MAX*, 2015, no. 3, pp. 73–78.
29. Dombrovsky L.A. Modelirovanie teplovogo izlucheniya polimernogo pokrytiya soderzhashchego polye mikrosfery [Modeling of thermal radiation of polymer coating containing hollow microspheres]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2005, vol. 43, no. 1, pp. 1–11.

Received: 15 April 2016.

#### Information about the authors

**Maksim V. Anisimov**, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

**Dmitry V. Lychagin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk State University.

**Vitaly S. Rekunov**, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

**Zhanibek T. Taalaybekov**, student, Tomsk State University of Architecture and Building.

УДК 665.613+617:550.84

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НЕФТИ КРАПИВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СООБЩЕНИЕ 2)

**Коваленко Елена Юрьевна<sup>1</sup>,**  
azot@ipc.tsc.ru

**Яновская Светлана Сергеевна<sup>1</sup>,**  
yanovskay@mail.ru

**Сагаченко Татьяна Анатольевна<sup>1</sup>,**  
dissovet@ipc.tsc.ru

**Мин Раиса Сергеевна<sup>1</sup>,**  
lgosn@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 получения детальной информации о составе и строении ароматических углеводородов и гетероорганических соединений масел нефти месторождения Крапивинское из верхнеюрских отложений на территории Томской области для решения проблем, связанных с получением на основе ее масляных компонентов высококачественных нефтепродуктов. Кроме того, накопление данных о химической природе аренов и гетероорганических соединений имеет существенное значение для познания фундаментальных законов генезиса нефтяных систем.

**Цель работы:** установление состава и строения ароматических углеводородов и гетероорганических соединений масляных компонентов нефти Крапивинского месторождения.

**Методы исследования:** жидкостно-адсорбционная хроматография, тонкослойная хроматография, кислотная экстракция, газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектором.

**Результаты.** С использованием комплекса современных аналитических методов установлено, что ароматические углеводороды масляных компонентов нефти Крапивинского месторождения представлены соединениями ряда бензола, нафталина, фенантрена, хризена, пирена, бензо-, дибензохризена и бензо-, дибензопирена. Среди гетероорганических соединений присутствуют серо-, азот- и кислородсодержащие структуры. В их составе идентифицированы алкилзамещенные тиофены и бензотиофены, голаядерные дибензо- и нафтобензотиофены и их алкилгомологи, моно- и бициклические сульфиды, алкилпроизводные хинолинов, бензо-, дибензохинолинов, азапиренов, тиофено- и бензотиофенохинолинов, карбазолов и дибензокарбазолов, незамещенные и алкилзамещенные дибензо- и нафтобензофураны. Особенностью данной нефти является наличие в составе ее масляных компонентов высокоалкилированных нафталинов. Низкие значения показателей зрелости, рассчитанные по составу полициклических ароматических углеводородов и циклических ароматических соединений серы, свидетельствуют, что исследуемая верхнеюрская нефть Крапивинского месторождения не подвергалась значительным катагенным преобразованиям.

### **Ключевые слова:**

Масла, моно- и полициклические ароматические углеводороды, серо-, азот- и кислородсодержащие соединения, распределение, состав.

### **Введение**

Предлагаемая работа является продолжением наших исследований метано-нафтенной нефти Крапивинского месторождения [1], одного из наиболее крупных месторождений Томской области, находящихся в промышленной разработке. В предыдущем сообщении приведены физико-химические характеристики нефти, рассчитаны структурные параметры молекул смолисто-асфальтеновых веществ, определен состав насыщенных углеводородов (УВ) масляных компонентов. На основании анализа полученных результатов сделан вывод, что исследуемая нефть по своим свойствам, структурно-групповому составу смол и асфальтенов, индивидуальному составу алканов и циклоалканов и относительному распределению УВ-биомаркеров является типичным представителем верхнеюрских нефтей на территории Томской области

Данная работа посвящена характеристике ароматических углеводородов (АУ) и гетероорганических соединений масляных компонентов нефти месторождения Крапивинское. Информация о составе и структуре этих классов соединений имеет значение для выбора оптимальных условий каталитического облагораживания светлых фракций, с целью получения высококачественных топливных материалов, и детализации геохимической истории исследуемой нефти.

### **Экспериментальная часть**

Исследуемые масла получены по методике [2], включающей осаждение асфальтенов 40-кратным избытком гексана, последующее разделение деасфальтенизата жидкостно-адсорбционной хроматографией на силикагеле АСК на масла, элюированные смесью гексана и бензола (70:30 по объему), и смолы, элюированные смесью этанола и бензола (50:50 по объему).

Сероорганические соединения (СС) экстрагировали из масел водным раствором серной кислоты 86%-й концентрации на первой ступени и 91%-й концентрации на второй ступени экстракции [3], азоторганические основания (АО) – уксуснокислым раствором серной кислоты с массовым соотношением минеральной, органической кислот и воды 25:37,5:37,5 [4].

Нейтральные азоторганические соединения (НАС) концентрировали методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на силикагеле АСК, используя в качестве элюентов гексан, смесь гексана с бензолом (50:50 по объему), бензол и смесь этанола с бензолом (50:50 по объему) [5]. Гексанбензолные элюаты отбирали порциями по 20 мл и анализировали методом тонкослойной хроматографии на силуфол в системе гексан–бензол (50:50 по объему). НАС обнаруживали путем опрыскивания насыщенным раствором хлоранила в смеси бензола с уксусной кислотой (50:50 по объему). Фракции, обладающие синим окрашиванием, характерным для соединений карбазольного ряда, объединяли.

Исходные масла и концентраты азот- и сероорганических соединений анализировали методом хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Масс-хроматограммы масел регистрировали на хромато-масс-спектрометре фирмы Hewlett Packard [6], масс-хроматограммы продуктов концентрирования – на DFS приборе Thermo Scientific [7]. Хроматограммы, полученные по значению полного ионного тока, анализировали с использованием характеристичных молекулярных или фрагментных ионов. Идентификацию соединений выполняли с привлечением литературных данных [8–15] и компьютерной библиотеки масс-спектров NIST 02.

### Результаты и их обсуждение

По данным ГХ-МС-анализа исходных масел и соответствующих продуктов концентрирования, АУ масляных компонентов нефти Крапивинского месторождения представлены моно-, би-, три-, тетра-, пента- и гексациклическими соединениями, в составе которых установлены УВ ряда бензола, нафталина, фенантрена, хризена, пирена, бензо-, дибензохризенов и бензо-, дибензопириенов. Среди гетероорганических соединений присутствуют серо-, азот- и кислородсодержащие структуры.

Групповой состав и молекулярно-массовое распределение ароматических углеводородов

Среди *моноаренов* обнаружены высококипящие алкилбензолы, представленные УВ нескольких гомологических рядов различного строения, которые могут содержать 1–2 метильные группы и одну длинную цепь нормального или разветвленного строения. В их составе идентифицированы н-алкил- (m/z 91), 1-алкил-2-метил-; 1-алкил-3-метил-; 1-алкил-4-метилбензолы (m/z 105) и диметилалкилбензолы (m/z 119) с общим числом атомов углерода в

молекуле от C<sub>14</sub> до C<sub>30</sub> и углеводороды C<sub>26</sub>, C<sub>27</sub> и C<sub>28</sub> с алкильными цепями изопреноидного строения. Максимум в распределении н-алкилбензолов приходится на гомолог C<sub>16</sub>. Концентрация ортозамещенных метилалкилбензолов значительно выше концентрации остальных дизамещенных изомеров. Среди алкилбензолов с разветвленной цепью обнаружены фитанил- (C<sub>26</sub>H<sub>46</sub>), 1-метил-3-фитанил- (C<sub>27</sub>H<sub>48</sub>) и 1,2-диметил-4-фитанилбензолы (C<sub>28</sub>H<sub>50</sub>).

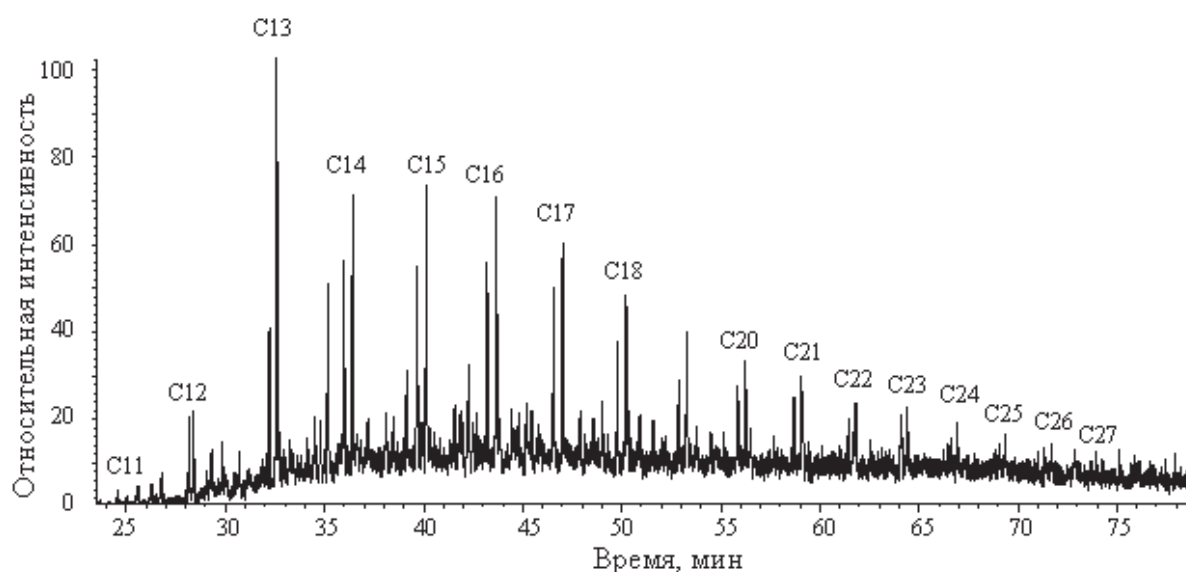
Идентифицированные *биарены* представлены моно-, би-, три-, тетра- и пентаалкилнафталинами, дифенилом (ДФ) и его алкилпроизводными от C<sub>1</sub>- до C<sub>4</sub>-ДФ. Среди моноалкилнафталинов присутствуют н-алкилнафталины (m/z 141), содержащие в алкильной цепи до 17 углеродных атомов. Длинноцепочечный заместитель может находиться в α- и β-положении. Преобладают β-изомеры (рис. 1).

Среди диалкилнафталинов (m/z 156) обнаружены диметил-, этил- и метилалкилнафталины (m/z 155) с числом атомов углерода в алкильной цепи от 2 до 13. Идентифицированы 2,6-; 2,7-; 1,7-; 1,3-; 1,6-; 2,3- и 1,2-диметилнафталины, 2- и 1-этилнафталины. В составе три- (m/z 170) и тетраалкилзамещенных нафталинов (m/z 184) однозначно установлены только метилсодержащие структуры: 1,3,7-; 1,3,6-; 1,3,5-; 1,4,6-; 2,3,6-; 1,2,7-; 1,6,7-; 1,2,6-; 1,2,4-; 1,2,5-триметилнафталины и 1,3,6,7-; 1,2,4,7-; 1,4,6,7-; 1,2,5,7-; 2,3,6,7-; 1,2,6,7-; 1,2,3,7-тетраметилнафталины. Большую часть полиметилзамещенных соединений составляют 1,2,5-триметилнафталины и 1,2,5,7-тетраметилнафталины.

В составе *триаренов* определен фенантрен (m/z 178) и его алкилзамещенные гомологи состава C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub>. Алкилфенантрены преобладают. Среди них присутствуют метил-, этил-, пропил-, бутил-, диметил-, триметил-, тетраметилфенантрены. Максимум содержания приходится на C<sub>1</sub>-фенантрены, в составе которых доминируют 1- и 9-метилфенантрены. Наряду с этими АУ был идентифицирован 1-метил-7-(1-метилэтил)-фенантрен (ретен, m/z 234).

*Тетра-, пента- и гексаарены* представлены, соответственно, хризенном, пиреном и их алкилзамещенными гомологами состава C<sub>1</sub>–C<sub>2</sub>, незамещенными бензопиреном и бензохризенном, а также дибензопиреном, дибензохризенном и их метилпроизводными.

Сравнение вышеприведенных данных с результатами исследования АУ в нефтях мезозойских отложений в пределах Томской области [16–18] показывает, что качественный состав и распределение соединений, идентифицированных в маслах нефти Крапивинского месторождения, характерны для нефтей из отложений верхней юры. Особенностью данной нефти является наличие высокоалкилированных структур в составе монозамещенных алкилнафталинов. Присутствие длинноцепочечных алкилнафталинов было установлено только в нижнеюрских и палеозойских нефтях Томской области [19].



$C_{11}-C_{28}$  – число атомов углерода в молекуле алкилнафталина  
 $C_{11}-C_{28}$  – number of carbon atoms in a alkylnaphthalene molecule

Рис. 1. Масс-фрагментограмма по иону  $m/z$  141 масел нефти Крапивинского месторождения

Fig. 1. Mass-fragmentogram for ion  $m/z$  141 of oily components in petroleum from Krapivinskoye oilfield

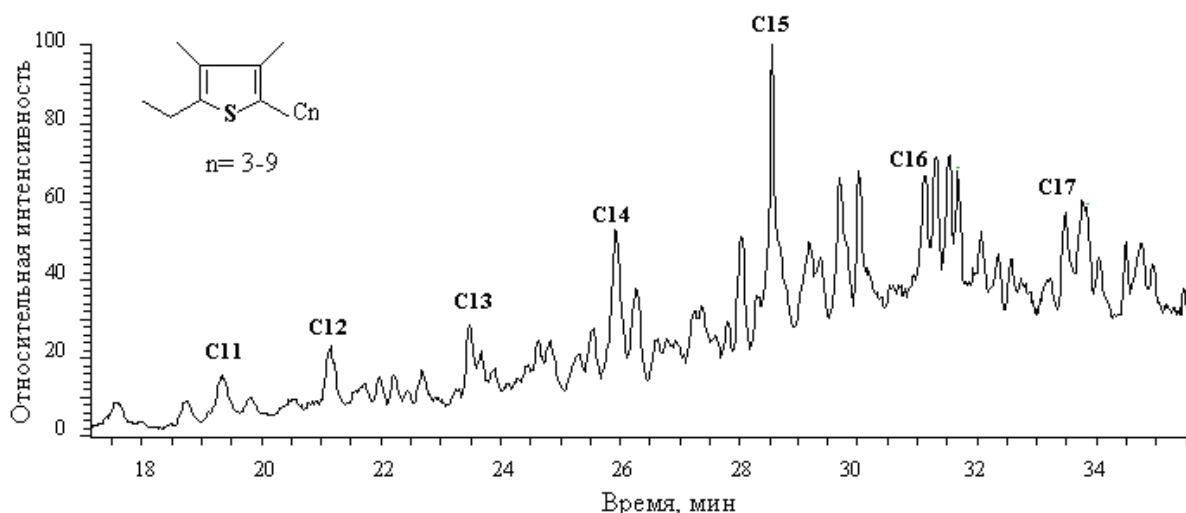
Групповой состав и молекулярно-массовое распределение гетероорганических соединений

В составе СС присутствуют ароматические и насыщенные соединения. Первый тип соединений представлен тиофенами, бензо-, дибензо- и нафтобензотиофенами. Среди **тиофенов** (ТФ) идентифицированы алкил-ТФ, содержащие в структуре, кроме алкильной цепи с количеством атомов углерода от 3–4 до 7–9, диметил-, этил- ( $m/z$  125), триметил-, этилметил- ( $m/z$  139), этилдиметил- ( $m/z$

153) и диэтилметил- ( $m/z$  167) заместители. В качестве примера на рис. 2 приведена масс-фрагментограмма концентрата СС по иону  $m/z$  153.

**Бензотиофены** (БТ,  $m/z$  176, 190) представлены, главным образом, алкилированными соединениями  $C_3-C_4$ -БТ, в составе которых могут присутствовать триметил-, метилэтил-, диметилэтил-, диэтил-, метилпропилзамещенные структуры.

Среди **дибензотиофенов** (ДБТ,  $m/z$  184, 198, 212, 226, 240) установлен ДБТ и его алкилпроиз-



$C_{11}-C_{27}$  – число атомов углерода в молекуле алкилнафталина  
 $C_{11}-C_{27}$  – number of carbon atoms in a alkylnaphthalene molecule

Рис. 2. Масс-фрагментограмма по иону  $m/z$  153 концентрата сернистых соединений масляных компонентов нефти Крапивинского месторождения

Fig. 2. Mass-fragmentogram for ion  $m/z$  153 of sulfur compounds concentrate in oily components of petroleum from Krapivinskoye oilfield

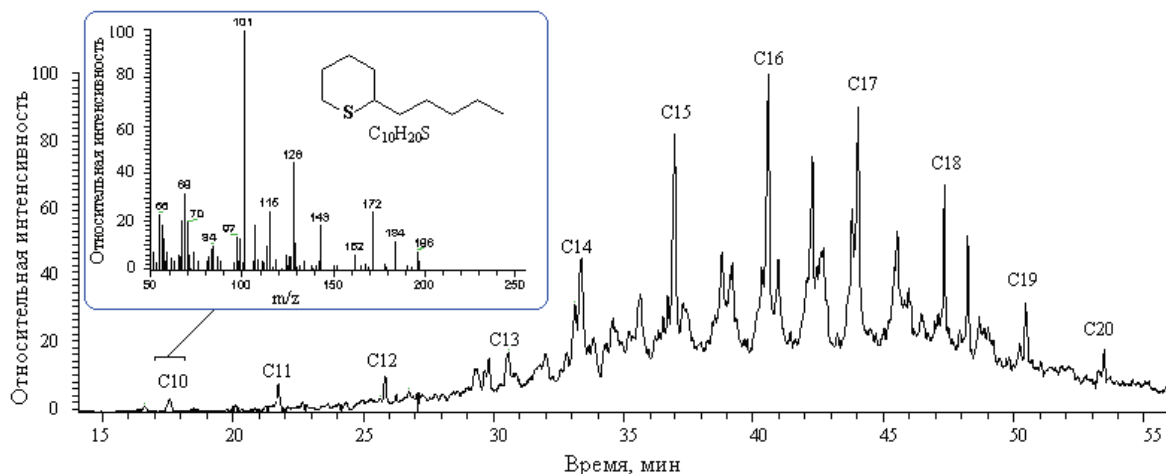
водные от  $C_1$ - до  $C_4$ -ДБТ с максимумом распределения на  $C_1$ - и  $C_2$ -ДБТ. В составе  $C_1$ -ДБТ идентифицированы 1-; 2-; 3- и 4-метил-ДБТ, в составе  $C_2$ -ДБТ – 4,6-; 2,4-; 1,3-диметил- и 2-этил-ДБТ.

Идентифицированные **нафтобензотиофены** (НБТ,  $m/z$  234, 246) представлены гомологами состава  $C_0$ - $C_1$ . Преобладает незамещенный НБТ, который может иметь структуру нафто[1,2-b]-, нафто[2,1-b]- и нафто[2,3-b]-бензотиофена.

Среди насыщенных **СС** масляных компонентов крапивинской нефти обнаружены алкилзамещен-

ные **тиациклогексаны**, представленные  $C_{10}$ - $C_{20}$  ( $m/z$  101) 2-н-алкилтианами (рис. 3) и  $C_{10}$ - $C_{20}$  ( $m/z$  115) цис- и транс-изомерами 5-метил-2-н-алкилтианов (рис. 4) с максимальным содержанием гомологов  $C_{16}$ , и бициклические сульфиды состава  $C_{12}H_{22}S$ - $C_{14}H_{26}S$  ( $m/z$  169).

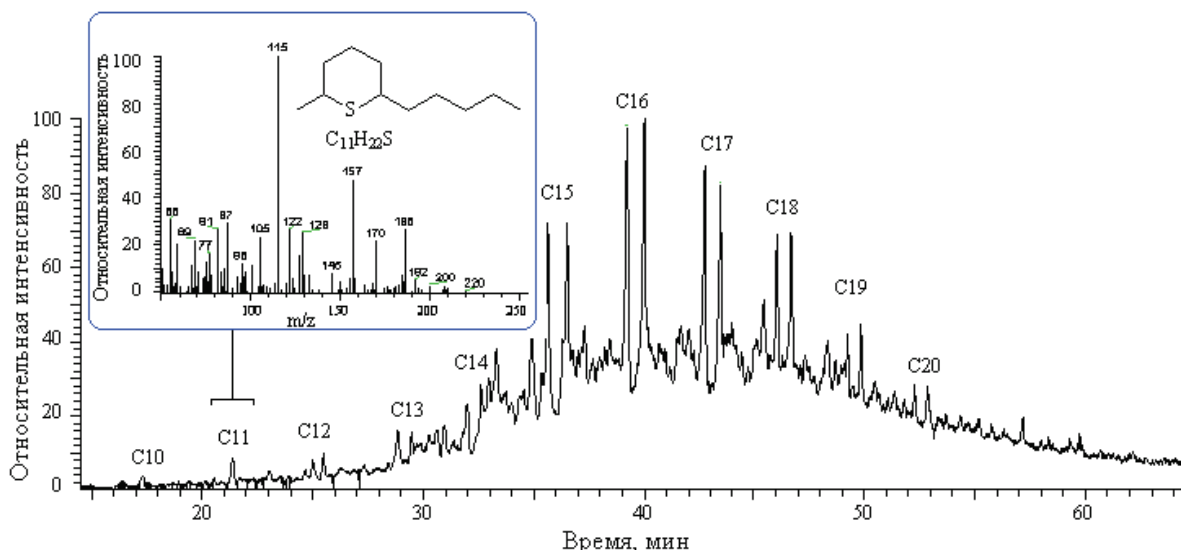
Следует отметить, что состав гетероциклических ароматических и насыщенных **СС**, идентифицированных в нефти Крапивинского месторождения, типичен для верхнеюрских нефтей Томской области [6, 17, 18, 20, 21].



$C_{10}$ - $C_{20}$  – число атомов углерода в молекуле алкилтиациклогексана  
 $C_{10}$ - $C_{20}$  – number of carbon atoms in a alkylthianes molecule

**Рис. 3.** Масс-фрагментограмма по иону  $m/z$  101 концентрата сернистых соединений масляных компонентов нефти Крапивинского месторождения и масс-спектр 2-пентилтиациклогексана ( $C_{10}H_{20}S$ )

**Fig. 3.** Mass-fragmentogram for ion  $m/z$  101 of sulfur compounds concentrate in oily components of petroleum from Krapivinskoye oilfield and mass-spectrum of 2-pentylthiacyclohexane ( $C_{10}H_{20}S$ )



$C_{10}$ - $C_{20}$  – число атомов углерода в молекуле алкилтиациклогексана  
 $C_{10}$ - $C_{20}$  – number of carbon atoms in a alkylthianes molecule

**Рис. 4.** Масс-фрагментограмма по иону  $m/z$  115 концентрата сернистых соединений масляных компонентов нефти Крапивинского месторождения и масс-спектр 5-метил-2-пентилтиациклогексана ( $C_{11}H_{22}S$ )

**Fig. 4.** Mass-fragmentogram for ion  $m/z$  115 of sulfur compounds concentrate in oily components of petroleum from Krapivinskoye oilfield and mass-spectrum of 5-methyl-2-pentylthiacyclohexane ( $C_{11}H_{22}S$ )

Среди *азоторганических соединений* масел крапивинской нефти присутствуют характерные для верхнеюрских нефтей Томской области представители основных и нейтральных веществ [20–22]. В составе АО установлены  $C_4$ – $C_9$ -хинолины ( $m/z$  185...255),  $C_1$ – $C_6$ -бензохинолины ( $m/z$  193...263),  $C_1$ – $C_2$ -добензохинолины ( $m/z$  243, 257),  $C_3$ – $C_4$ -азапилены ( $m/z$  245, 259),  $C_2$ – $C_4$ -тиофенохинолины ( $m/z$  213, 227, 241) и  $C_2$ – $C_3$ -бензотиофенохинолины ( $m/z$  263, 277), в составе НАС –  $C_1$ – $C_2$ -бензокарбазолы ( $m/z$  231, 245) и  $C_1$ -добензокарбазолы ( $m/z$  281).

Характер масс-спектров интенсивных пиков на масс-хроматограммах обнаруженных компонентов (максимальная интенсивность пика молекулярного иона, низкое отношение ионов  $[M-H]^+/M^+$ , отсутствие пиков перегруппировочных ионов) свидетельствует, что заместители в структуре соединений карбазольного ряда и практически всех типов азоторганических оснований преимущественно представлены метильными группами [8–10].

Исключение составляют алкилхинолины. В их составе отсутствуют полностью метилированные структуры. Идентифицированные алкилхинолины могут одновременно содержать в молекуле метильный и этильный, пропильный или изопропильный заместители. Об этом свидетельствует наличие в масс-спектрах, помимо пика молекулярного иона, интенсивных пиков фрагментных ионов, соответствующих разрыву бензильной связи и перегруппировки шестичленного кольца [8, 9]. Детальный анализ показал, что среди алкилхинолинов присутствуют: 2-этилдиметил- и 8-этилдиметилхинолины ( $m/z$  185), 2,4-диметил-8-изопропил- и 2-этилтриметилхинолины ( $m/z$  199), этилтетраметил- и 2,3,4-триметил-8-изопропилхинолины ( $m/z$  213), 8-изопропилтетраметилхинолин ( $m/z$  227), 2-изопропилпентаметилхинолин ( $m/z$  241). Однозначно установлены также 2-метилбензо(н)хинолин, 2,4- и 2,3-диметилбензо(н)хинолины и 2,4,6-триметилбензо(н)хинолин.

В составе *кислородных соединений* масел крапивинской нефти идентифицированы дибензофуран ( $m/z$  168),  $C_1$ - и  $C_2$ -добензофураны ( $m/z$  182, 196) и нафтобензофуран ( $m/z$  218).

Полученные в работе данные о составе и структуре полициклических АУ и гетероциклических аромати-

ческих соединений серы были использованы для геохимической характеристики исследуемой нефти. В практике геохимических исследований широко применяют отношения суммы изомеров метилфенантрена к феноантрону и изомеров метилдобензотиофена между собой, позволяющие оценить степень термической зрелости нефтей [6, 23, 24]. Для нефти Крапивинского месторождения значения метилфенантренового ( $MPI-1=1,5*(3-Me+2-Me)/(Ph+9-Me+1-Me)$ ) и метилдобензотиофенового (4-МДБТ/1-МДБТ) индексов невысоки (0,49 и 1,07 соответственно), что указывает на низкую степень ее катагенной преобразования. Незрелый характер нефтей Крапивинского месторождения отмечен также в работе [25].

### Заключение

Анализ молекулярного состава АУ и гетероорганических соединений масел крапивинской нефти свидетельствует о том, что качественный состав практически всех установленных классов соединений характерен для нефтей из отложений верхней юры на территории Томской области. Идентифицированные АУ представлены УВ ряда бензола, нафталина, феноантрена, хризена, пирена, бензо-, дибензохризена и бензо-, дибензопирена. Среди гетероорганических соединений масел исследуемой нефти присутствуют серо-, азот- и кислородсодержащие структуры, представленные циклическими соединениями различной степени цикличности и водородной ненасыщенности: алкилтиофенами и алкилбензотиофенами, голоядерными и алкилзамещенными дибензо- и нафтобензотиофенами, моно- и бициклическими сульфидами, алкилпроизводными хинолинов, бензо-, добензохинолинов, азапиленов, тиофено- и бензотиофенохинолинов, карбазолов и дибензокарбазолов, незамещенными и алкилзамещенными дибензо- и нафтобензофуранами. Особенностью данной нефти является наличие в составе ее масляных компонентов высокоалкилированных нафталинов. Показатели зрелости, рассчитанные с привлечением данных об изомерном составе полициклических АУ и циклических ароматических соединений серы, свидетельствуют, что исследуемая нефть Крапивинского месторождения, залегающая в отложениях верхней юры, не подвергалась значительным катагенным преобразованиям.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химический состав нефти Крапивинского месторождения / А.Э. Торломова, Т.В. Чешкова, Е.Ю. Коваленко, Т.А. Сагаченко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 48–53.
2. Современные методы исследования нефтей / под ред. А.И. Богомолова, М.Б. Темьянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984. – 431 с.
3. Чертков Я.Б., Спиркин В.Г. Сернистые и кислородные соединения нефтяных дистиллятов. – М.: Химия, 1971. – 312 с.
4. Выделение и фракционирование азотистых оснований из нефти / Н.Н. Герасимова, Т.А. Сагаченко, О.А. Бейко, В.Д. Огородников // Нефтехимия. – 1987. – Т. 27. – № 1. – С. 32–38.
5. Карбазолы нефти / Е.Б. Фролов, М.Б. Смирнов, Н.А. Ванюкова, П.И. Санин // Нефтехимия. – 1989. – Т. 29. – № 3. – С. 291–303.
6. Sergun V.P., Min R.S. Sulfur compounds in crude oils of the Jurassic–Paleozoic play in Western Siberia // Petroleum Chemistry. – 2012. – V. 52. – № 2. – P. 68–73.
7. Low-molecular-mass asphaltene compounds from Usa heavy oil / V.P. Sergun, E.Yu. Kovalenko, T.A. Sagachenko, R.S. Min // Petroleum Chemistry. – 2014. – V. 54. – № 2. – P. 83–87.
8. Вульфсон Н.С., Закин В.Г., Микая А.И. Масс-спектрометрия органических соединений. – М.: Химия, 1986. – 312 с.



9. Schmitter J.M., Arpino P.J. Azaarenes in fuels // *Mass-spectrometry Reviews*. – 1985. – V. 4. – № 1. – P. 87–121.
10. Influence of maturity on carbazole and benzocarbazole distributions in crude oils and rocks from the Souda de Campeche, Gulf of Mexico / H. Glegg, H. Wilkes, T. Oldenburg, D. Santamaria-Orozco, B. Horsfield // *Organic Geochemistry*. – 1998. – V. 29. – № 1–3. – P. 183–194.
11. Oxygen compounds in Atabasca asphaltene / Z. Frakman, M.T. Ignasiak, E.M. Lown, O.P. Strausz // *Energy and Fuels*. – 1990. – V. 4. – № 3. – P. 236–270.
12. Исследование состава смол пиролизатов юрских сланцев из скважины 356 Чим-Лоптюгская / Д.А. Бушнев, И.Н. Бурцев, О.В. Валяева, И.А. Перовский, Г.В. Игнатъев, Н.С. Бурдельная // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. – 2014. – № 9. – С. 15–19.
13. Gas chromatographic retention behavior of polycyclic aromatic sulfur heterocycles compounds, (dibenzothiophene, naphtho[b]thiophenes, benzo[b]naphthothiophenes and alkyl-substituted derivatives) on stationary phases of different selectivity / S.G. Mossner, M.J. Lopez de Alda, L.C. Sander, M.L. Lee, S.A. Wise // *Journal of Chromatography A*. – 1999. – V. 841. – № 2. – P. 207–228.
14. Yin C. A Study of the distribution of sulfur compounds in gasoline produced in China. P. 3. Identification of individual sulfides and thiophenes // *Fuel*. – 2004. – V. 83. – № 4–5. – P. 433–441.
15. Geosynthesis of dibenzothiophenes and alkyl-dibenzothiophenes in crude oils and sediments by carbon catalysis / M. Asif, R. Alexander, T. Fazeelat, K. Pierce // *Organic Geochemistry*. – 2009. – V. 40. – № 8. – P. 895–901.
16. Головки Ю.А. Закономерности распределения и состава насыщенных и ароматических углеводородов в нефтях различных возрастных отложений // *Химия нефти и газа: материалы IV Международной конференции*. – Томск: Изд-во «СТТ», 2000. – Т. 1 – С. 83–87.
17. Belitskaya E.A., Serebrennikova O.V., Kadychagov P.B. Crude oils from the Koltogor rift and adjacent areas (West Siberia): Specifics of the composition of aromatic compounds // *Petroleum Chemistry*. – 2008. – V. 48. – № 4. – P. 260–268.
18. Чиркова Д.Ю. Особенности химического состава и природа нефтей Нюрольской впадины (юго-восток Западной Сибири): автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 2016. – 22 с.
19. Гончаров И.В., Носова С.В., Вяткина Н.В. Нафталиновые углеводороды нефтей нижней юры и палеозоя Томской области // *Химия нефти и газа: материалы IV Международной конференции*. – Томск: Изд-во «СТТ», 2000. – Т. 1. – С. 207–209.
20. Distribution and composition of heteroorganic compounds in oils from upper Jurassic deposits of Western Siberia / N.N. Gerasimova, E.Yu. Kovalenko, V.P. Sergun, T.A. Sagachenko, R.S. Min // *Petroleum Chemistry*. – 2005. – V. 45. – № 4. – P. 219–227.
21. Regularities of distribution and composition of heteroatomic components in Paleozoic and Jurassic oils of southeastern West Siberia / T.A. Sagachenko, N.N. Gerasimova, E.Y. Kovalenko, V.P. Sergun, R.S. Min // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 5–6. – P. 745–754.
22. Герасимова Н.Н., Сагаченко Т.А., Коваленко Е.Ю. Распределение азоторганических соединений в нефтях Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // *Химия нефти и газа: материалы IV Международной конференции*. – Томск: Изд-во «СТТ», 2000. – Т. 1. – С. 75–79.
23. Углеводородные и гетероатомные соединения – показатели термической зрелости органического вещества и нафтидов / Т.Л. Виноградова, В.А. Чахмахчев, З.Г. Агафонова, З.В. Якубсон // *Геология нефти и газа*. – 2001. – № 6. – С. 49–55.
24. Использование геохимических исследований при подсчете запасов и разработке нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений / И.В. Гончаров, Н.В. Обласов, В.В. Самойленко, А.В. Сметанин, Е.Л. Журова // *Недропользование – XXI век*. – 2012. – Т. 36. – № 5. – С. 50–55.
25. Генетические типы и природа флюидов углеводородных залежей юго-востока Западной Сибири / И.В. Гончаров, Н.В. Обласов, В.В. Самойленко, С.В. Фадеева, Е.Л. Журова // *Нефтяное хозяйство*. – 2012. – № 11. – С. 8–13.

Поступила 12.04.2016 г.

#### Информация об авторах

**Коваленко Е.Ю.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Яновская С.С.**, кандидат химических наук, младший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Сагаченко Т.А.**, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Мин Р.С.**, доктор химических наук, заведующая лабораторией гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 665.613+617:550.84

**CHEMICAL COMPOSITION OF PETROLEUM FROM KRAPIVINSKOYE OILFIELD (MESSAGE 2)**

**Elena Yu. Kovalenko<sup>1</sup>,**  
azot@ipc.tsc.ru

**Svetlana S. Yanovskaya<sup>1</sup>,**  
yanovskay@mail.ru

**Tatyana A. Sagachenko<sup>1</sup>,**  
dissovet@ipc.tsc.ru

**Raisa S. Min<sup>1</sup>,**  
lgosn@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
4, Akademicheskoye Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

*The work is relevant due to the need of obtaining the detailed information on composition and structure of aromatic hydrocarbons and heteroorganic compounds of oily components in petroleum occurring in Krapivinskoye oilfield, Upper Jurassic deposits in Tomsk region, to solve the problems of obtaining high-quality petroleum products, based on oily components. In addition the accumulation of data on the nature of these classes of compounds is essential for understanding the fundamental laws of petroleum system genesis.*

**The aim** of the research is to identify the composition and structure of aromatic hydrocarbons and heteroorganic compounds of oily components in petroleum from Krapivinskoye oilfield.

**Methods:** liquid-adsorption chromatography, thin layer chromatography, acid extraction, gas chromatography with mass-spectrometer detector.

**Results.** Using a complex of up-to-date analytical methods the authors have found that aromatic hydrocarbons of oily components in petroleum from Krapivinskoye oilfield are represented by a number of compounds of the following series: benzene, naphthalene, phenanthrene, chrysene, pyrene, benzo-, dibenzochrysene and benzo-, dibenzopyrene. Sulfur-, nitrogen- and oxygen-containing structures are among the heteroorganic compounds. Alkyl-substituted thiophenes and benzothiophenes, holonuclear dibenzo- and naphthobenzothiophenes and their alkyl homologues, mono- and bicyclic sulfides, alkyl derivatives of quinolines, benzo-, dibenzoquinolines, azapyrenes, thiopheno- and benzothiophenoquinolines, carbazoles and dibenzocarbazoles, unsubstituted and alkyl-substituted dibenzo- and naphthobenzofurans were identified in their composition. The presence of highly alkylated naphthalenes in the composition of oily components is a special feature of this petroleum. Low values of maturity indicators, calculated on the composition of polycyclic aromatic hydrocarbons and cyclic aromatic sulfur compounds, indicate that the investigated petroleum from Upper Jurassic Krapivinskoye oilfield was not subjected to significant catagen transformations.

**Key words:**

Oily components, mono- and polycyclic aromatic hydrocarbons, sulfur-, nitrogen and oxygen-containing compounds, distribution, composition.

**REFERENCES**

1. Torlomoeva A.E., Cheshkova T.V., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A. Chemical composition of petroleum from Krapivinskoye oilfield. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 48–53. In Rus.
2. *Sovremennyye metody issledovaniya neftey* [A manual of modern oil investigation techniques], Eds. A.I. Bogomolov, M.B. Temyanko, L.I. Khotyntseva. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 431 p.
3. Chertkov Ya.B., Spirkin V.G. *Sernistyie i kislородnye soedineniya neftyanykh distillyatov* [Sulphurous and oxygen compounds of oil distillates]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 312 p.
4. Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Beyko O.A., Ogorodnikov V.D. Vydelenie i fraktsionirovanie azotistykh osnovaniy iz nefiti [Allocation and fractionation of the nitrogenous bases from oil]. *Petroleum Chemistry*, 1987, vol. 27, no. 1, pp. 32–38.
5. Frolov E.B., Smirnov M.B., Vanyukova N.A., Sanin P.I. Karbazoly nefiti [Oil carbazoles]. *Petroleum Chemistry*, 1989, vol. 29, no. 3, pp. 291–303.
6. Sergun V.P., Min R.S. Sulfur compounds in crude oils of the Jurassic–Paleozoic play in Western Siberia. *Petroleum Chemistry*, 2012, vol. 52, no. 2, pp. 68–73.
7. Sergun V.P., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A., Min R.S. Low-molecular-mass asphaltene compounds from Usa heavy oil. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 83–87.
8. Vulfson N.S., Zaikin V.G., Mikaya A.I. *Mass-spektrometriya organicheskikh soedineniy* [Mass spectrometry of organic compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 1986, 312 p.
9. Schmitter J.M., Arpino P.J. Azaarenes in fuels. *Mass-spectrometry Reviews*, 1985, vol. 4, no. 1, pp. 87–121.
10. Glegg H., Wilkes H., Oldenburg T., Santamaria-Orozco D., Horsfield B. Influence of maturity on carbazole and benzocarbazole distributions in crude oils and rocks from the Souda de Campeche, Gulf of Mexico. *Organic Geochemistry*, 1998, vol. 29, no. 1–3, pp. 183–194.
11. Frakman Z., Ignasiak M.T., Lown E.M., Strausz O.P. Oxygen compounds in Atabasca asphaltene. *Energy and Fuels*, 1990, vol. 4, no. 3, pp. 236–270.
12. Bushnev D.A., Burtsev I.N., Valyaeva O.V., Perovsky I.A., Ignatov G.V., Burdelnaya N.S. The study of the pyrolysis of resins in Jurassic shales of the 356 well-Chim Loptyugskaya. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2014, no. 9, pp. 15–19. In Rus.
13. Mossner S.G., Lopez de Alda M.J., Sander L.C., Lee M.L., Wise S.A. Gaschromatographic retention behavior of polycyclic

- aromatic sulfur heterocycles compounds, (dibenzothiophene, naphtho [b] thiophenes, benzo [b] naphthothiophenes and alkyl-substituted derivatives) on stationary phases of different selectivity. *Journal of Chromatography A*, 1999, vol. 841, no. 2, pp. 207–228.
14. Yin C. A Study of the distribution of sulfur compounds in gasoline produced in China. Part 3. Identification of individual sulfides and thiophenes. *Fuel*, 2004, vol. 83, no. 4–5, pp. 433–441.
  15. Asif M., Alexander R., Fazeelat T., Pierce K. Geosynthesis of dibenzothiophenes and alkyl-dibenzothiophenes in crude oils and sediments by carbon catalysis. *Organic Geochemistry*, 2009, vol. 40, no. 8, pp. 895–901.
  16. Golovko Yu.A. Zakonomernosti raspredeleniya i sostava nashchennykh i aromaticheskikh uglevodorodov v neftyakh razlichnykh vozrastnykh otlozheniy [Regularities of distribution and composition of saturated and aromatic hydrocarbons in oils of various age deposits]. *Khimiya nefi i gaza. Materialy IV mezhdunarodnoy konferentsii* [Oil and gas chemistry. The 4<sup>th</sup> International Conference on Oil and Gas Chemistry]. Tomsk, STT Publ., 2000. Vol. 1, pp. 83–87.
  17. Belitskaya E.A., Serebrennikova O.V., Kadychagov P.B. Crude oils from the Koltogor rift and adjacent areas (West Siberia): Specifics of the composition of aromatic compounds. *Petroleum Chemistry*, 2008, vol. 48, no. 4, pp. 260–268.
  18. Chirkova D.Yu. *Osobennosti khimicheskogo sostava i priroda neftey Nyurolskoy upadiny (yugo-vostok Zapadnoy Sibiri)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Features of a chemical composition and nature of a oils of Nyurolsky hollow (southeast of Western Siberia) Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2016. 22 p.
  19. Goncharov I.V., Nosova S.V., Vyatkina N.V. Naftalinovye uglevodorody neftey nizhney yury i paleozoya Tomskoy oblasti [Naphthalenic hydrocarbons of oils of lower Yura and Paleozoic of Tomsk region]. *Khimiya nefi i gaza. Materialy IV mezhdunarodnoy konferentsii* [Oil and gas chemistry. The 4<sup>th</sup> International Conference on Oil and Gas Chemistry]. Tomsk, STT Publ., 2000. Vol. 1, pp. 207–209.
  20. Gerasimova N.N., Kovalenko E.Yu., Sergun V.P., Sagachenko T.A., Min R.S. Distribution and composition of heteroorganic compounds in oils from upper Jurassic deposits of Western Siberia. *Petroleum Chemistry*, 2005, vol. 45, no. 4, pp. 219–227.
  21. Sagachenko T.A., Gerasimova N.N., Kovalenko E.Y., Sergun V.P., Min R.S. Regularities of distribution and composition of heteroatomic components in Paleozoic and Jurassic oils of southeastern West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 745–754.
  22. Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Kovalenko E.Yu. Raspredelenie azotorganicheskikh soedineniy v neftyakh Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii [Distribution of nitrogen-organic compounds in oils of West Siberian oil-and-gas province]. *Khimiya nefi i gaza. Materialy IV mezhdunarodnoy konferentsii* [Oil and gas chemistry. The 4<sup>th</sup> International Conference on Oil and Gas Chemistry]. Tomsk, STT Publ., 2000. Vol. 1, pp. 75–79.
  23. Vinogradova T.L., Chakhmakhev V.A., Agafonova Z.G., Yakubson Z.V. Uglevodorodnye i geteroatomnye soedineniya – pokazateli termicheskoy zrelosti organicheskogo veshchestva i nafitidov [Hydrocarbonic and heteroatomic compounds are the indicators of a thermal maturity of organic substance and naftide]. *Oil and Gas Geology*, 2001, no. 6, pp. 49–55.
  24. Goncharov I.V., Oblasov N.V., Samoylenko V.V., Smetanin A.V., Zhurova E.L. Use of geochemical researches when calculating stocks and developing oil and oil-gas condensate fields. *Nedropolzovanie XXI vek*, 2012, vol. 36, no. 5, pp. 50–55. In Rus.
  25. Goncharov I.V., Oblasov N.V., Samoylenko V.V., Fadeeva S.V., Zhurova E.L. Genetic types and nature of fluids of hydrocarbonic deposits of the southeast of West Siberia. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2012, no. 11, pp. 8–13. In Rus.

Received: 12 April 2016.

#### Information about the authors

**Elena Yu. Kovalenko**, Cand. Sc., senior research scientist, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Svetlana S. Yanovskaya**, Cand. Sc., junior research scientist, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Tatyana A. Sagachenko**, Dr. Sc., leading research scientist, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Raisa S. Min**, Dr. Sc., Head of the laboratory, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 549.25/28:581.526.3(476.22–1)Жлобин)

## НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИБРЕЖНО-ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ВОДОЕМОВ ВБЛИЗИ Г. ЖЛОБИНА ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Дайнеко Николай Михайлович<sup>1</sup>,

Dajneko@gsu.by

Тимофеев Сергей Федорович<sup>1</sup>,

Sertimo@mail.ru

Жадько Светлана Владимировна<sup>1</sup>,

Zhadkosv@mail.ru

<sup>1</sup> Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,  
Республика Беларусь, 246019, г. Гомель, ул. Советская, 104.

**Актуальность.** Контроль процессов техногенного воздействия на окружающую среду от работы добывающих, горнообогатительных и перерабатывающих предприятий является современной важной научной и практической проблемой, при этом для оценки состояния водных объектов большое внимание уделяется анализу прибрежно-водной растительности и донным отложениям. Мониторинг содержания тяжелых металлов в растительных образцах эуэпифитов и в экологических группах изучаемых объектов на примере г. Жлобина Республики Беларусь позволит выработать подходы к разработке методик диагностики превышения предельно допустимых норм содержания этих элементов. Данные исследования по накоплению девяти тяжелых металлов в 49 растительных образцах разных экологических групп, проведенные вблизи Белорусского металлургического завода, указывают на актуальность этого направления, дополняют и согласуются с результатами исследований российских и зарубежных ученых.

**Цель работы:** выявить индикаторные виды и экологические группы растений, наиболее интенсивно накапливающие тяжелые металлы в водоемах.

**Методы исследований:** флористический, геоботанический, атомно-абсорбционный.

**Результаты.** Проведен анализ проб воды, почвогрунта, почвы, а также растительных образцов изучаемых объектов. В пробах воды содержание четырех химических элементов в отдельных объектах превышало предельно допустимую концентрацию – кобальта в 1,2–1,4 раза; марганца – в 4,2–5,1 раза; кадмия – в 1,2–1,8 раза; никеля – в 1,3–2,4 раза. В пробах почвы в двух объектах отмечалось превышение предельно допустимой концентрации меди в 1,4–11,6 раза. Наибольшее содержание тяжелых металлов в растительных образцах отмечалось у эуэпифитов, взвешенных в толще воды, плейстоэпифитов неукореняющихся и плейстоэпифитов укореняющихся. Установлено, что из проанализированных 49 растительных образцов 48 (98 %) превышали фоновое содержание Co, 45 (91,9 %) – Zn, 23 (47 %) – Mn, 22 (44,9 %) – Cu, 6 (12,3 %) – Ni, 5 (10,2 %) – Cr. У всех растительных образцов не обнаружено накопления Pb и Cd выше фона. Анализ показал, что более всего *Ceratophyllum demersum* L. 1753 накапливает Cu, Ni; *Lemna minor* L. 1753 – Cu, Cr, Mn, Ni; *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray – Cu, Zn, Ni, Cr; *Nuphar lutea* (L.) Smith – Fe; *Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmb 1919 – Fe; *Typha latifolia* L. 1753 – Zn, Mn; *Sagittaria sagittifolia* L. – Ni, Cr; *Phalaroides arundinacea* (L.) Rauschert 1960 – Fe, Zn. Наиболее часто накапливаются такие химические элементы, как Cu, Ni, Cr, Fe, Mn. Полученные результаты содержания тяжелых металлов позволяют выявить площадь загрязнения природной среды вокруг промышленных центров, а также использовать их для геохимического мониторинга и на основе этого разрабатывать мероприятия по снижению тяжелых металлов в природной среде.

### Ключевые слова:

Прибрежно-водная растительность, экологические группы, тяжелые металлы, фоновое содержание, растительные образцы, объекты.

### Введение.

В последние десятилетия в процессы миграции тяжелых металлов в природной среде интенсивно включилась антропогенная деятельность человека. Количества химических элементов, поступающие в окружающую среду в результате техногенеза, в ряде случаев значительно превосходят уровень их естественного поступления. Основными источниками антропогенного поступления тяжелых металлов в окружающую среду являются: тепловые электростанции, металлургические предприятия, транспорт, химические средства защиты сельскохозяйственных культур от болезней и вредителей, сжигание нефти и различных отходов, производство стекла, удобрений, цемента и

пр. [1]. Мониторинг накопления тяжелых металлов прибрежно-водной растительностью водоемов является одним из важнейших инструментов контроля процессов техногенного воздействия на окружающую среду, вызванного функционированием вышеперечисленных предприятий.

Высшие водные растения составляют неотъемлемый компонент водной экосистемы, формируют биологическое разнообразие, являются биологическими ресурсами, индикаторами состояния водной среды. Сложившаяся система контроля загрязнения водоемов базируется на анализе водной среды, которая характеризуется динамичностью и неустойчивостью концентрации и состава химических элементов во времени, что значительно сни-

жает информативность получаемых данных. В настоящее время для оценки состояния водных объектов большое внимание придается анализу депонирующих сред: высшей водной растительности и донным осадкам. Способность высших водных растений и осадков накапливать вещества в концентрациях, превышающих значения в водной среде, обусловила их использование в системе мониторинга и контроля состояния окружающей среды [2].

Влияние накопления тяжелых металлов на содержание пигментов фотосинтеза растений из прибрежной зоны города Тюмени изучали А.Л. Корнилов, Г.А. Петухова [3]. Особенности накопления тяжелых металлов высшей водной растительностью в условиях Волгоградского водохранилища изучала А.И. Кочеткова. Установлены корреляционные связи между Fe, Ni, Cr, Co, Mn, Cu, Zn, Pb и ряды накопления их в золе макрофитов. Выявлены виды-индикаторы Sr, Cu, Zn, Pb. По абсолютному содержанию в растениях тяжелые металлы подразделяются на четыре группы: элементы повышенной концентрации (Sr, Mn, Fe, Zn), средней (Cu, Ni, Cr, Pb) и низкой (Mo, Cd, Se, Co) [4].

Проведено исследование содержания тяжелых металлов в воде, макрофитовых и рыбах в бассейне р. Букукун в пределах Сохондинского государственного природного биосферного заповедника и его охранной зоны. Выявлено превышение допустимых норм в печени *Lota lota* (Linnaeus, 1758) по меди, мышцах *Brachymystax lenok* (Pallas, 1773) и *L. lota* по цинку. Необходимо проведение мониторинга за тяжелыми металлами на территории заповедника [5].

Впервые изучена флора канализационных очистных сооружений открытого типа в Тюмени (Западная Сибирь). Определено содержание тяжелых металлов в растениях аборигенных и адвентивных видов [6].

Представлены результаты изучения содержания ионов пяти тяжелых металлов (Fe, Mn, Ni, Zn, Cu) в вегетативных органах ряда видов макрофитов (*Carex acuta* L. 1753, *Equisetum fluviatile* L. 1753, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. 1840, *Typha angustifolia* L. 1753, *T. latifolia* L. 1753), произрастающих в рыбоводческих прудах СГУП «Рыбхоз "Пихтовка"» (Удмуртская Республика). В целях профилактики загрязнения водных экосистем ионами тяжелых металлов предложены биотехнические мероприятия, применение которых позволит оптимизировать среду обитания гидробионтов в условиях аквакультуры [7].

В современных условиях антропогенного воздействия оценка содержания тяжелых металлов в воде и выявление тенденций изменчивости их концентраций в речных экосистемах важны не только для определения уровня загрязненности рек, но и для поддержания экологической безопасности в регионе и принятия мер по восстановлению водных экосистем [8].

В работе А.Г. Уварова исследовано влияние эпифитовзвеси на увеличение концентраций тяжелых металлов (ТМ) в макрофитах. Рассмотрены особенности накопления ТМ взвесью на разных видах растений, обитающих в различных водных объектах, даны практические рекомендации по учету влияния взвеси на концентрации ТМ в водных растениях [9].

Влияние концентрации тяжелых металлов на водные растения и на необходимость постоянного контроля за их накоплением отмечалось в работах [10–17]. Результаты наших исследований [18–20] согласуются с результатами вышеперечисленных авторов.

Как показывает анализ литературных данных, проведенные исследования имеют научную и практическую значимость для Гомельского региона. В Гомельской области многие города с развитой промышленностью расположены на берегах рек Сож, Днепр, Припять, Березина, Двина, Ипать. Так, в г. Жлобине, расположенном на берегу р. Днепр, находится крупный Белорусский металлургический завод, являющийся источником техногенного воздействия на окружающую среду.

#### Объекты и методы исследований

Материалом для исследований послужили пробы воды и почвы и образцы прибрежно-водной растительности, отобранные в летний период 2013 г. в водоемах вблизи крупного промышленного центра г. Жлобина. Флористический состав изучали по методу А.А. Корчагина [21]. Латинские названия видов высших растений даны по определителю [22]. Распределение растительности по экологическим группам осуществлялось по классификации Гигевича [23].

Было проанализировано 6 проб воды, 12 проб почвы и 49 растительных образцов.

Отбор проб воды из природных горизонтов водной толщи выполнялся батометром ПВ-1,0. В день отбора пробы доставлялись в лабораторию [24]. Пробу воды отбирали на профиле учета в зоне зарослей водных растений на глубине 20–30 см от поверхности. Объем пробы воды на химический анализ составлял не менее 2 литров. Кроме того, предварительную обработку, транспортировку и хранение проб производили таким образом, чтобы в содержании и составе определяемых компонентов и свойствах воды не происходило существенных изменений. Для этого пробу воды консервировали хлороформом (добавляли 2–4 мл  $\text{CHCl}_3$  на 1 л пробы) [24, 25].

Отбор донных осадков производили пробоотборником ГР-51. Отобранные пробы донных отложений после доставки в лабораторию высушивали до воздушно-сухого состояния в фарфоровых чашках при температуре 75 °С. Затем измельчали в агатовой ступке и упаковывали в полиэтиленовые пакеты для последующего элементного анализа.

Отбор растительного материала производили на выбранных участках рек вручную. После доставки растительного материала в лабораторию его высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 65 °С. Затем пробы размалывали на лабораторной мельнице МРП-2, просеивали через сито и упаковывали в полиэтиленовые пакеты. Для определения тяжелых металлов растительный материал сжигали в муфельной печи (сухой способ минерализации), после чего полученную золу переводили солянокислой вытяжкой в мерные колбы и проводили элементарный анализ. Высушенные пробы, отобранные для определения химического состава, измельчали ножницами, секатором или в мельнице, помещали в пронумерованные пакеты, конверты или мешочки и передавали в химическую лабораторию на озонирование растений, которое выполняли при температуре 500 °С. В золе растений определяли содержание тяжелых металлов [24, 27].

Анализы проб воды и почвы, а также растительных образцов выполняли на атомно-абсорбционном спектрометре Solaar M-6 в РНИУП «Институт радиологии» МЧС РБ, в лаборатории массовых анализов.

Для определения аккумуляции исследуемых тяжелых металлов использовали коэффициент биологического накопления (КБН), показывающий способность растений избирательно поглощать химические элементы. Его вычисляли по формуле:  $K_{BH} = \frac{\text{содержание элемента в растении}}{\text{содержание элемента в почве}}$ . Считается, что если  $K_{BH} > 1$ , то растение является концентратором исследуемого элемента. Если  $K_{BH} < 1$ , то вид не аккумулирует металл в своем организме. Для водных растений  $K_{BH} = \frac{\text{содержание элемента в растении}}{\text{содержание элемента в воде}}$ .

При оценке фонового содержания тяжелых металлов в прибрежно-водных растениях использовалась работа белорусских исследователей, в которой приводятся значения фонового содержания [2].

Для определения качества воды в водоемах нами использовались показатели предельно допустимых концентраций (ПДК) тяжелых металлов в воде рыбохозяйственных водных объектов [28].

Ниже приводится характеристика объектов изучаемой прибрежно-водной растительности. Точки отбора проб были зафиксированы с помощью навигатора GPS Garmin 72. Координаты объекта: северная широта (N), восточная долгота (E).

Объект № 1. Правобережная пойма р. Днепр у моста против г. Жлобина выше выброса городской ливневки. Координаты: N 52°55'62", E 30°02'590".

Объект № 2. Правый низкий берег р. Днепр, вблизи лодочной станции г. Жлобина, ниже выброса ливневки. Координаты: N 52°53'562", E 30°03'796".

Объект № 3. Правобережное притеррасное озеро р. Добысна у моста, юго-западнее г. Жлобина,

напротив слива городской ливневки. Координаты: N 52°50'662", E 30°01'998".

Объект № 4. Правобережная притеррасная пойма р. Днепр напротив слива Жлобинского водоканала. Координаты: N 52°51'964", E 30°49'292".

Объект № 5. Правобережная центральная пойма р. Днепр в пяти км южнее г. Жлобина, ниже слива водоканала. Координаты: N 52°50'687", E 30°3'383".

Объект № 6. Озеро центральной правобережной поймы р. Днепр у моста выше слива городских вод Жлобинского водоканала. Координаты: N 52°55'752", E 30°2'123".

### Результаты исследований

Ниже представлены результаты анализа проб воды и почвы. Анализ проб воды изучаемых объектов показал, что во всех объектах не наблюдалось превышения ПДК по железу, меди, цинку, свинцу, хromу. Во всех объектах содержание кадмия было выше ПДК от 1,2 раза в 6-м объекте до 1,8 раза в 5-м. В пяти объектах накопление никеля превышало уровень ПДК от 1,3 (во 2-м объекте) до 2,4 раза (в 6-м объекте). Содержание кобальта, соответственно, в 1,2 раза и 1,4 раза выше ПДК, а содержание марганца выше ПДК в 1-м объекте в 5,1 раза, а в 3-м – в 4,2 раза.

Таким образом, содержание четырех химических элементов: кобальта, марганца, никеля и кадмия, в отдельных объектах превышало уровень ПДК.

Анализ проб почвы изучаемых объектов выявил, что из двенадцати проб только в двух отмечалось превышение ПДК по содержанию меди: в 1-м объекте, в почвогрунте из воды – в 11,6 раза; в 3-м объекте, в почве с берега – в 1,4 раза. Анализ 49 растительных образцов показал, что в группу эугидрофитов, полностью погруженных, неукореняющихся, взвешанных в толще воды, входил один вид – роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L. 1753). Содержание меди в нем (7,2 мг/кг абс. сух. сост.) в два раза выше фона (3,0 мг/кг), никеля (1,1 мг/кг) – в 3,8 раза, хрома (2,3 мг/кг) – в 6,6 раза. Содержание остальных элементов (цинка, кобальта, марганца, свинца и кадмия) не превышало фона.

В группу плейстогидрофитов неукореняющихся, свободноплавающих входили два растительных образца одного вида ряски малой (*Lemna minor* L. 1753). Наибольшее количество железа (3736 мг/кг) содержала ряска малая в 5-м объекте, у нее же и высокий коэффициент накопления (Кн), равный 1245400. Также в данном объекте обнаружено содержание меди – 5,5 мг/кг, что выше фона в 1,6 раза. В обоих растительных образцах наблюдалось превышение фонового содержания по цинку в 3-м объекте – в 27,1 раза, здесь же был высокий Кн, а в 5-м объекте – в 4,2 раза. Наибольшее превышение фона по марганцу (2743 мг/кг) отмечалось в 5-м объекте – в 9,1 раза, у него же и высо-

кий КН (2742700). Содержание кадмия (0,01 мг/кг) не превышало фонового содержания. В обоих образцах никеля накапливалось выше фона: в 3-м объекте (2,8 мг/кг) в 9,4 раза, а в 5-м (0,76 мг/кг) – в 2,5 раза; хрома в 5-м объекте (1,9 мг/кг) – в 5,4 раза, и здесь самый высокий Кн (1850).

Группа плейстогигрофитов укореняющихся представлена двумя образцами кубышки желтой (*Nuphar lutea* L.) в 5-м и 6-м объектах и двумя образцами горца земноводного (*Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray) в 3-м и 5-м объектах. Из четырех растительных образцов только у горца земноводного в 5-м объекте наблюдалось превышение содержания меди (6,8 мг/кг) в 1,9 раза, у него же и большой КН (4,6). Во всех растительных образцах наблюдалось превышение фона по цинку, особенно у горца земноводного в 3-м объекте (57,6 мг/кг) – 40,9 раза, здесь и выше Кн (10,4). Также во всех четырех образцах отмечалось превышение фона и по марганцу. Наибольшее содержание было у кубышки желтой в 5-м объекте (2179 мг/кг), что в 7,2 раза выше фона, а наибольший Кн (62,7) – у горца земноводного в 3-м объекте. По свинцу и кадмию не наблюдались превышения фона. Только два образца из четырех накапливали никель выше фона – горец земноводный (0,69 мг/кг) в 2,3 раза, кубышка желтая (0,37 мг/кг) – в 1,3. По хрому только горец земноводный в 5-м объекте (1,15 мг/кг) превышал фон в 3,4 раза, у него и самый высокий Кн.

Группа аэрогидрофитов высокорослых представлена шестью растительными образцами трех видов рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L. 1753), манника большого (*Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holub) и тростника обыкновенного (*Phragmites communis* Trin. 1820). Наибольшее содержание железа (257,6 мг/кг) было у манника большого в 5-м объекте, а Кн (0,395) – у рогоза узколистного в 3-м объекте. Содержание меди, свинца, кадмия, никеля и хрома у всех шести растительных образцов не превышало их фонового содержания. Одновременно с этим в тех же образцах отмечалось превышение фонового содержания цинка, особенно у рогоза узколистного в 6-м объекте (18,2 мг/кг), что в 9,4 раза выше фона, у него же и наибольший Кн (2,31). Только в двух растительных образцах рогоза узколистного в 3-м объекте (320 мг/кг) и особенно в 6-м объекте (2822,0 мг/кг) наблюдалось превышение фонового содержания марганца соответственно в 1,1 и 9,4 раза. Наибольший Кн отмечен у рогоза узколистного в 3-м объекте (34,4).

В группу аэрогидрофитов среднерослых входило 26 растительных образцов 8 видов: осоки острой (*Carex acuta* L.), осоки ложносытевой (*Carex pseudocyperus* L.), частухи подорожниковой (*Alisma plantago-aquatica* L. 1753), ежеголовника прямого (*Sparganium erectum* L. 1753), сусака зонтичного (*Butomus umbellatus* L. 1753), стрелолиста обыкновенного

(*Sagittaria sagittifolia* L. 1753), хвоща приречного (*Equisetum fluviatile* L. 1753), ситняга болотного (*Eleocharis palustris* (L. Roem. et Schult. 1902).

Наибольшим накоплением железа отличались стрелолист обыкновенный в 5-м (900 мг/кг), 2-м (818 мг/кг) и 6-м (694 мг/кг) объектах, а также ежеголовник прямой в 5-м объекте (680 мг/кг), высокий Кн зафиксирован у частухи подорожниковой в 3-м объекте (0,32). Из 26 растительных образцов у 20 отмечалось превышение фонового содержания по меди: более всего накапливалось у частухи подорожниковой во 2-м объекте (11,7 мг/кг), что в 3,3 раза выше фона, в 1-м, 3-м объектах, а у сусака зонтичного – в 5-м (6,5 мг/кг), почти в 2 раза больше фона.

У 22 растительных образцов из 26 наблюдалось превышение фонового содержания по цинку. Наибольшим накоплением отличались сусак зонтичный в 6-м объекте (38,9 мг/кг) – в 27,6 раза, частуха подорожниковая в 1-м и 2-м объектах – в 22,5 раза, а наибольший Кн (6,2) зафиксирован у хвоща приречного во 2-м объекте.

Из 26 растительных образцов у 13 отмечалось превышение фона по содержанию марганца, причем более всего у ежеголовника прямого (1745 мг/кг) – в 5,6 раза и стрелолиста обыкновенного (809,7 мг/кг) – в 2,7 раза в 5-м объекте. Наибольший Кн марганца (16,0) наблюдался у частухи подорожниковой в 3-м объекте.

Накопление свинца и кадмия не превышало фонового содержания. Из 26 растительных образцов только у стрелолиста обыкновенного в 6-м объекте зафиксировано превышение фонового содержания по никелю в 1,7 раза и по хрому в 1,8 раза.

Группа эуигрофитов высокорослых представлена тремя растительными образцами двукисточника тростниковидного (*Phalaroides arundinacea* (L.) Rauschert 1820). Наибольшие количества железа и КН обнаружено у этого растения в 4-м объекте. Не отмечено превышение фонового содержания в растительных образцах меди, марганца, свинца, кадмия, никеля и хрома. Цинка все три растительных образца накапливали выше фона, а больше всего – двукисточник тростниковидный в 6-м объекте (36,2 мг/кг), у него и самый высокий КН (4,5).

Содержание тяжелых металлов в растительных образцах эуигрофитов среднерослых представлено в табл. 1. Эуигрофиты среднерослые представлены 4 видами и 7 растительными образцами. Это вербейник обыкновенный (*Lysimachia vulgaris* L. 1753), поручейник широколистный (*Sium latifolium* L. 1753), крапива двудомная (*Urtica dioica* L. 1753), череда трехраздельная (*Bidens tripartite* L. 1753).

Наибольшее содержание железа отмечено у вербейника обыкновенного в 1-м объекте, а наибольший КН – у крапивы двудомной – в 3-м объекте. У 4 растительных образцов (57,2 %) из 7 отме-

чалось превышение фонового содержания по меди, причем наибольшее превышение отмечено у череды трехраздельной в 6-м объекте в 2,3 раза, а также у поручейника широколистного в 1-м объекте, в 2,1 раза, у него же высокий КН. У всех растительных образцов наблюдалось превышение фонового содержания цинка, особенно у поручейника широколистного – в 48,8 раза, здесь и самый высокий КН. Только у двух растительных образцов отмечалось повышенное накопление марганца, самое высокое у поручейника широколистного во 2-м

объекте, выше фона в 2 раза. Во всех растительных образцах не обнаружено превышения фонового содержания по кадмию, свинцу, никелю и хрому.

Анализ содержания тяжелых металлов среди экологических групп показал (табл. 2), что наибольшее содержание железа и коэффициент накопления наблюдался у эугидрофитов, полностью погруженных, взвешенных в толще воды. Почти в два раза ниже содержание железа у плейстогидрофитов неукореняющихся, свободно плавающих. Также у эугидрофитов полностью погруженных, не-

**Таблица 1.** Содержание тяжелых металлов в растительных образцах эугидрофитов среднерослых

**Table 1.** Content of heavy metals in plant samples of middle-height euhygrophytes

Вид растения, номер объекта Species, Study plot number	Определяемые показатели, абс.-сух. сост., мг/кг Chemical elements, absolutely dry state, mg/kg								
	Fe	Cu	Zn	Co	Mn	Pb	Cd	Ni	Cr
<i>Эугидрофиты среднерослые/Euhygrophytes, middle-height</i>									
Yellow loosestrife ( <i>Lysimachia vulgaris</i> ), 1	<u>400,0</u> 0,14	<u>4,6</u> 5,97	<u>6,0</u> 1,77	<u>0,03</u> 0,11	<u>158,0</u> 1,39	<u>0,04</u> 0,06	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,07</u> 0,12	<u>0,04</u> 0,15
Great water-parsnip ( <i>Sium latifolium</i> ), 1	<u>36,0</u> 0,01	<u>7,4</u> 9,6	<u>68,0</u> 21,0	<u>0,03</u> 0,11	<u>95,0</u> 0,84	<u>0,04</u> 0,06	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,10</u> 0,18	<u>0,03</u> 0,12
Great water-parsnip ( <i>Sium latifolium</i> ), 2	<u>243,0</u> 0,07	<u>1,43</u> 1,8	<u>3,0</u> 0,31	<u>0,03</u> 0,08	<u>609,0</u> 4,36	<u>0,04</u> 0,08	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,09</u> 0,18	<u>0,01</u> 0,03
Common nettle ( <i>Urtica dioica</i> ), 3	<u>265,0</u> 0,18	<u>5,8</u> 1,38	<u>28,0</u> 3,17	<u>0,03</u> 0,12	<u>76,0</u> 0,75	<u>0,04</u> 0,01	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,07</u> 0,13	<u>0,03</u> 0,03
Great water-parsnip ( <i>Sium latifolium</i> ), 4	<u>44,0</u> 0,01	<u>1,7</u> 0,66	<u>13,0</u> 0,42	<u>0,03</u> 0,03	<u>168,0</u> 0,33	<u>0,04</u> 0,02	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,02</u> 0,01	<u>0,02</u> 0,01
Great water-parsnip ( <i>Sium latifolium</i> ), 5	<u>131,0</u> 0,02	<u>3,6</u> 1,30	<u>25,0</u> 1,65	<u>0,03</u> 0,03	<u>315,0</u> 0,73	<u>0,04</u> 0,01	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,04</u> 0,02	<u>0,01</u> 0,01
Three-lobed Beggarticks ( <i>Bidens tripartita</i> ), 6	<u>119,0</u> 0,03	<u>8,1</u> 5,73	<u>19,0</u> 2,44	<u>0,03</u> 0,08	<u>114,0</u> 0,77	<u>0,04</u> 0,02	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,07</u> 0,04	<u>0,01</u> 0,02
Среднее Mean	<u>177,0±58,9</u> 0,06	<u>4,7±0,98</u> 3,78	<u>23,0±3,4</u> 4,44	<u>0,03±0</u> 0,08	<u>219,0±71,5</u> 1,31	<u>0,04±0</u> 0,04	<u>0,01±0</u> 0,14	<u>0,07±0,01</u> 0,10	<u>0,02±0,005</u> 0,05
Фоновое содержание Background content	–	3,0	1,41	0,01	301,0	2,38	0,01	0,3	0,34

**Таблица 2.** Содержание тяжелых металлов в экологических группах изучаемых объектов г. Жлобина

**Table 2.** Content of heavy metals in ecological groups of plants of the studied sites near the city of Zhlobin

Экологические группы Ecological groups	Определяемые показатели, абс.-сух. сост., мг/кг Chemical elements, absolutely dry state, mg/kg								
	Fe	Cu	Zn	Co	Mn	Pb	Cd	Ni	Cr
Эугидрофиты, полностью погруженные, неукореняющиеся, взвешенные в толще воды <i>Euhygrophytes, fully submerged, not rooted, midwater</i>	<u>5261,0</u> 1753666	<u>7,2</u> 7210,0	<u>0,04</u> 20,0	<u>0,011</u> 0,0	<u>0,13</u> 130,0	<u>0,23</u> 230,0	<u>0,01</u> 1,11	<u>1,14</u> 87,7	<u>2,26</u> 2260,0
Плейстогидрофиты неукореняющиеся, свободно плавающие <i>Pleistohygrophytes, freely floating, not rooted</i>	<u>2675,2</u> 630771,0	<u>4,2</u> 3460,0	<u>22,03</u> 4193,0	<u>0,03</u> 30,0	<u>1855,0</u> 1372493	<u>0,04</u> 40,0	<u>0,01</u> 1,2	<u>1,80</u> 88,2	<u>1,10</u> 110,0
Плейстогидрофиты укореняющиеся <i>Pleistohygrophytes, rooted</i>	<u>747,0</u> 0,45	<u>2,5</u> 7,9	<u>21,4</u> 3,9	<u>0,03</u> 0,11	<u>1201,0</u> 20,5	<u>0,04</u> 0,08	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,30</u> 0,97	<u>0,39</u> 0,24
Аэрогидрофиты высокорослые <i>Aerohygrophytes, high-height</i>	<u>143,0</u> 0,12	<u>1,47</u> 2,5	<u>8,82</u> 1,4	<u>0,03</u> 0,09	<u>611,0</u> 10,7	<u>0,04</u> 0,04	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,06</u> 0,09	<u>0,02</u> 0,03
Аэрогидрофиты среднерослые <i>Aerohygrophytes, middle-height</i>	<u>220,0</u> 0,08	<u>3,7</u> 11,6	<u>12,5</u> 2,0	<u>0,03</u> 0,10	<u>324,0</u> 2,2	<u>0,04</u> 0,07	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,07</u> 0,12	<u>0,04</u> 0,06
Эугидрофиты высокорослые <i>Euhygrophytes, high-height</i>	<u>156,0</u> 0,02	<u>2,2</u> 1,7	<u>14,64</u> 1,7	<u>0,03</u> 0,06	<u>125,0</u> 0,63	<u>0,04</u> 0,04	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,04</u> 0,04	<u>0,04</u> 0,05
Эугидрофиты среднерослые <i>Euhygrophytes, middle-height</i>	<u>177,0</u> 0,06	<u>4,7</u> 3,8	<u>23,2</u> 4,4	<u>0,03</u> 0,08	<u>219,0</u> 1,32	<u>0,04</u> 0,04	<u>0,01</u> 0,14	<u>0,07</u> 0,10	<u>0,02</u> 0,05
Фоновое содержание Background content	–	3,0	1,41	0,01	301,0	2,38	0,01	0,3	0,34

Примечание. В числителе указано содержание тяжелых металлов в растениях, в знаменателе – коэффициент накопления.

Note. The numerator indicates the content of heavy metals in plants, the denominator – the accumulation coefficient.



кореняющихся, взвешенных в толще воды отмечено и самое высокое содержание меди среди остальных экологических групп, а наибольший КН зафиксирован у аэрогидрофитов среднерослых. Во всех экологических группах, за исключением эугидрофитов полностью погруженных, неукореняющихся, взвешенных в толще воды, наблюдалось превышение фонового содержания цинка, особенно у эуигрофитов среднерослых – в 16,5 раза, и у плейстогидрофитов неукореняющихся, свободно плавающих – в 15,6 раза, у них же и высокий КН. Наибольшее содержание марганца отмечалось в группе плейстогидрофитов неукореняющихся, свободно плавающих, здесь превышение фона было в 6,2 раза, у них и самый высокий КН, у плейстогидрофитов укореняющихся – в 4 раза. У всех экологических групп содержание свинца оказалось гораздо ниже фона, а кобальта, за исключением эуигрофитов неукореняющихся, взвешенных в толще воды – в 3 раза выше фона. У эуигидрофита роголистника, погруженного в 5-м объекте, содержание цинка было в 5,75 раза выше, чем у остальных групп, а КН превосходил в десятки раз. Также во всех экологических группах содержание кадмия не превышало фонового, и оно было практически равным во всех экологических группах. Только в двух экологических группах зафиксировано превышение фонового содержания по никелю: у плейстогидрофитов неукореняющихся, свободно плавающих – в 6 раз, у эуигидрофитов, полностью погруженных, неукореняющихся, взвешенных в толще воды, – в 3,8 раза, а наибольший КН – у плейстогидрофитов укореняющихся. Наибольшее превышение фона и КН по содержанию хрома наблюдалось

у эуигидрофита, полностью погруженного, неукореняющегося, взвешенного в толще воды, – в 6,6 раза, у плейстогидрофитов неукореняющихся, свободно плавающих – в 3,2 раза, и у плейстогидрофитов укореняющихся – в 1,13 раза.

#### Заключение

Анализ проб воды изучаемых объектов показал, что во всех объектах не наблюдалось превышения ПДК по железу, меди, цинку, свинцу, хрому. Содержание четырех химических элементов: кобальта, марганца, никеля и кадмия, в отдельных объектах превышало уровень ПДК.

Анализ проб почвы показал, что из двенадцати проб только в двух отмечалось превышение ПДК по содержанию меди, а в остальных пробах не установлено превышения ПДК по содержанию тяжелых металлов.

Практически во всех растительных образцах отмечено превышение фонового содержания кобальта и цинка – 98 и 91,9 % соответственно. В 47 % образцов зафиксировано превышение фонового содержания марганца и в 44,9 % образцов – меди. Тогда как для никеля и хрома этот показатель превышен в 12,3 и 10,2 % образцов соответственно.

Проведенные исследования позволили выявить семь видов растений, которые накапливали наибольшее количество тяжелых металлов. Так, ряска малая и горец земноводный более других накапливали медь, хром, марганец, никель, цинк, кубышка желтая и манник большой – железо, рогоз узколистный и двукосточник тростниковидный – цинк, марганец и цинк, железо, стрелолист – никель, хром.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. – М.: Мысль, 1983. – 272 с.
2. Власов Б.П., Гигевич Г.С. Использование высших водных растений для оценки и контроля за состоянием водной среды. – Мн.: БГУ, 2002. – 84 с.
3. Корнилов А.Л., Петухова Г.А. Влияние накопления тяжелых металлов на содержание пигментов фотосинтеза растений из прибрежной зоны водоемов г. Тюмени // Вестник Тюменского государственного университета. – 2012. – № 12. – С. 189–194.
4. Кочеткова А.И. О некоторых закономерностях накопления тяжелых металлов высшей водной растительностью на Волгоградском водохранилище // Вестник Волгоградского государственного университета. – 2012. – № 1 (20). – С. 305–309.
5. Куклин А.П., Афонин А.В. Содержание тяжелых металлов в воде и организмах в бассейне реки Букукун // Успехи современного естествознания. – 2014. – Вып. 5. – С. 85–89.
6. Ильминских Н.Г. Накопление тяжелых металлов синантропными растениями очистных сооружений города Тюмени // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1 (9). – С. 2230–2232.
7. Капитонова О.А., Шалавина В.С., Алтынцев А.В. Содержание тяжелых металлов в макрофитах рыбохозяйственных прудов СГУП «Рыбхоз "Пихтовка"» (Удмуртская Республика) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – № 1. – С. 255–260.
8. Решетняк О.С., Рвачева М.Ю. Современные тенденции изменчивости содержания тяжелых металлов в воде рек Печенга и Нива // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 2 (21). – С. 128–130.
9. Уваров А.Г. Влияние эпифитовзвеси на накопление тяжелых металлов в макрофитах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – Вып. 8. – С. 12–24.
10. Базарова Б.Б. Содержание химических элементов в *Elodea canadensis* Michx. в водоемах Забайкалья // Вода: химия и экология. – 2015. – № 7. – С. 43–51.
11. Aquatic acute species sensitivity distributions of ZnO and CuO nanoparticles / N. Adama, C. Schmitt, L. De Bruyn, D. Knapen, R. Blust // Science of the Total Environment. – 2015. – № 526. – P. 233–242.
12. Jing Li, Haixin Yu, Yaning Luan. Meta-Analysis of the Copper, Zinc, and Cadmium Absorption Capacities of Aquatic Plants in Heavy Metal-Polluted Water / Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2015. – № 12 (12). – P. 14958–14973.
13. Engina M.S., Uyanikb A., Kutbayc H.G. Accumulation of Heavy Metals in Water, Sediments and Wetland Plants of Kizilirmak Delta (Samsun, Turkey) // International Journal of Phytoremediation. – 2015. – V. 17. – Iss. 1. – P. 66–75.
14. Phillips D.P., Human L.R.D., Adams J.B. Wetland plants as indicators of heavy metal contamination // Marine Pollution Bulletin. – March 2015. – V. 92. – Iss. 1. – P. 227–232.
15. Strategies for Cd accumulation in *Dittrichia viscosa* (L.) Greuter: role of the cell wall, non-protein thiols and organic acids /

- R. Fernández, D. Fernández-Fuego, A. Bertrand, A. González // Plant Physiology and Biochemistry. – 2014. – № 78. – P. 63–70.
16. Uyanik A., Kutbay H.G. Accumulation of heavy metals in water, sediments and wetland plants of kizilirmak delta (samsun, Turkey) // Journal Phytoremediation. – 2015. – № 17. – P. 66–75.
17. Jing Li, Haixin Yu, Yaning Luan. Meta-Analysis of the Copper, Zinc, and Cadmium Absorption Capacities of Aquatic Plants in Heavy Metal-Polluted Water // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – № 12. – P. 14958–14973.
18. Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Аккумуляция радиоцезия и тяжелых металлов прибрежно-водной растительностью в некоторых районах Гомельской области (Республика Беларусь), приграничных с Брянской областью России // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 220–225.
19. Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Оценка состояния прибрежно-водной растительности Гомельского района // Известия Гомельского государственного университета. – 2013. – № 5 (80). – С. 63–70.
20. Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Накопление тяжелых металлов прибрежно-водной растительностью Гомельского региона. – Чернигов: Лозовой, 2014. – 208 с.
21. Корчагин А.А. Видовой (флористический) состав растительных сообществ и методы его изучения // Полевая геоботаника: сб. науч. ст. – Л.: Наука, 1964. – Т. 3. – С. 39–62.
22. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В. И. Парфенова. – Мн.: Дизайн ПРО, 1999. – 472 с.
23. Гигевич Г.С., Власов Б.П., Вынаев Г.В. Высшие водные растения Беларуси: эколого-биологическая характеристика, использование и охрана. – Мн.: Издательский центр БГУ, 2001. – 231 с.
24. Русанов А.К. Основы количественного спектрального анализа руд и минералов. – М.: Недра, 1978. – 400 с.
25. Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 268 с.
26. Физические и физико-химические методы анализа при геохимических исследованиях / науч. ред. В.А. Рудник, А.А. Смыслов. – Л.: Недра, 1986. – 262 с.
27. Зайдель А.Н. Основы спектрального анализа. – М.: Наука, 1965. – 324 с.
28. Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь №№ 43/42 от 8 мая 2007 г. URL: [https://www.google.by/url?s\\_a=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahU-K E w j o 4 9 f E j \\_ L M A h X J X i w K H d a A D q E Q F g g a - M A A &url=http%3A%2F%2Fminzdrav.gov.by%2Ffiles%2F000127\\_802014\\_N701-39\\_2009.doc&usg=AFQjCNFTanu9zzYX-px15e3mbtdHiyhe-g&bvm=bv.122676328,b s.1,d .bGs](https://www.google.by/url?s_a=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahU-K E w j o 4 9 f E j _ L M A h X J X i w K H d a A D q E Q F g g a - M A A &url=http%3A%2F%2Fminzdrav.gov.by%2Ffiles%2F000127_802014_N701-39_2009.doc&usg=AFQjCNFTanu9zzYX-px15e3mbtdHiyhe-g&bvm=bv.122676328,b s.1,d .bGs) (дата обращения: 20.01.2016).

Поступила 22.02.2016 г.

#### Информация об авторах

**Дайнеко Н.М.** кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины.

**Тимофеев С.Ф.** кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины.

**Жадько С.В.** ассистент кафедры ботаники и физиологии растений Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины.

UDC 549.25/28:581.526.3(476.2-21)Жлобин

## ACCUMULATION OF HEAVY METALS BY RIVERSIDE AND WATER VEGETATION IN WATER BODIES NEAR THE CITY OF ZHLOBIN, GOMEL REGION, BELARUS

Nikolai M. Dayneko<sup>1</sup>,

Dajneko@gsu.by

Sergey F. Timofeev<sup>1</sup>,

Sertimo@mail.ru

Svetlana V. Zhadko<sup>1</sup>,

Zhadkosv@mail.ru

<sup>1</sup> F. Skorina Gomel State University,  
104, Sovetskaya street, Gomel, 246019, Belarus.

**Relevance.** Monitoring of extractive, mining processing and recycling enterprises impact on the environment is the important current scientific and practical problem. The analysis of riverside and water vegetation, and bottom sediments is often used to assess the status of water bodies. Monitoring of heavy metals in euhygrophytes plant samples on the example of Zhlobin (Republic of Belarus) allows developing new techniques for estimating threshold limits excess. The study of accumulation of nine heavy metals in 49 plant samples, carried out near the Belarusian Steel Works, indicated the urgency of this trend, complement and consistent with the results of investigations of Russian and foreign researchers.

**The main aim** of the study is to reveal the indicator species and ecological plant groups with the most intensive accumulation of heavy metals in water bodies.

**The methods used in the study:** floristic, geobotanical, atomic absorption.

**The results.** The authors have analyzed water, soil and plant samples. In water, the maximum content of cobalt exceeded the threshold limits in 1,2–1,4 times, manganese – in 4,2–5,1 times, cadmium – in 1,2–1,8 times, nickel – in 1,3–2,4 times. In soil, the maximum content of copper exceeded the threshold limits in 1,4–11,6 times. Euhydrophytes and pleistophytes accumulated the highest levels of heavy metals. The maximum content of Co exceeded the background concentration in 48 (98 %) plant samples, Zn – 45 (91,9 %), Mn – 23 (47 %), Cu – 22 (44,9 %), Ni – 6 (12,3 %), Cr – 5 (10,2 %). The maximum content of Pb and Cd did not exceed the background concentration. *Ceratophyllum demersum* L. 1753 accumulated the highest levels of Cu and Ni, *Lemna minor* L. 1753 – Cu, Cr, Mn, Ni; *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray – Cu, Zn, Ni, Cr; *Nuphar lutea* (L.) Smith – Fe; *Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holub 1919 – Fe; *Typha latifolia* L. 1753 – Zn, Mn; *Sagittaria sagittifolia* L. 1753 – Ni, Cr; *Phalaroides arundinacea* (L.) Rauschert 1960 – Fe, Zn. Such elements as Cu, Ni, Cr, Fe, Mn are accumulated most of all. The results detect the environmental pollution area around the industrial centers. They can be used for geochemical monitoring and help us to develop the measures for reducing the heavy metal content in the environment.

### Key words:

Riverside and water vegetation, ecological groups, heavy metals, background content, plant specimens, objects.

### REFERENCES

- Dobrovolskiy V.V. *Geografiya mikroelementov. Globalnoe rasseyaniye* [Geography of microelements. Global scattering]. Moscow, Mysl Publ., 1983. 272 p.
- Vlasov B.P., Gigevich G.S. *Ispolzovanie vysshikh vodnykh rasteniy dlya otsenki i kontrolya za sostoyaniem vodnoy sredy* [Use of high water plants for estimating and controlling water medium state]. Minsk, BGU Press, 2002. 84 p.
- Kornilov A.L., Petukhova G.A. Influence of heavy metal accumulation on the content of pigments of photosynthesis of plants from coastal area of Tyumen water reservoirs. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 12, pp. 189–194. In Rus.
- Kochetkova A.I. On some laws of heavy metal accumulation by high water plants on Volgograd water reservoir. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 1 (20), pp. 305–309. In Rus.
- Kuklin A.P., Afonin A.V. Heavy metal content in water and organisms in the basin of the Bukukun river. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2014, Iss. 5, pp. 85–89. In Rus.
- Ilminkikh N.G. Heavy metal accumulation by synanthropic plants of treatment facilities in Tyumen. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 1 (9), pp. 2230–2232. In Rus.
- Kapitonova O.A., Shalavina V.S., Altyintsev A.V. Heavy metal content in macrophytes of commercial fishing ponds of «Rybkhoz "Pihtovka"» (Udmurtskaya Respublika) *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2014, no. 1, pp. 255–260. In Rus.
- Reshetnyak O.S., Rvacheva M.Yu. Modern trends of instability of heavy metal content in the Pechenga and Niva rivers. *International Research Journal*, 2014, no. 2 (21), pp. 128–130. In Rus.
- Uvarov A.G. Vliyanie epifitovzvzvi na nakoplenie tyazhelykh metallov v makrofitakh [Influence of epiphyte-suspension on heavy metal accumulation in macrophytes]. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2015, Iss. 8, pp. 12–24.
- Bazarova B.B. Soderzhanie himicheskikh elementov v Elodea canadensis Michx. v vodoemah Zabaykalya [Chemical elements content in *Elodea canadensis* Michx. in Trans-Baikal water reservoirs]. *Water: chemistry and ecology*, 2015, no. 7, pp. 43–51.
- Adama N., Schmitt C., De Bruyn L., Knapen D., Blust R. Aquatic acute species sensitivity distributions of ZnO and CuO nanoparticles. *Science of the Total Environment*, 2015, no. 526, pp. 233–242.
- Jing Li, Haixin Yu, Yaning Luan. Meta-Analysis of the Copper, Zinc, and Cadmium Absorption Capacities of Aquatic Plants in Heavy Metal-Polluted Water. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2015, no. 12 (12), pp. 14958–14973.

13. Engina M.S., Uyanikb A., Kutbaye H.G. Accumulation of Heavy Metals in Water, Sediments and Wetland Plants of Kizilirmak Delta (Samsun, Turkey). *International Journal of Phytoremediation*, 2015, vol. 17, Iss. 1, pp. 66–75.
14. Phillips D.P., Human L.R.D., Adams J.B. Wetland plants as indicators of heavy metal contamination. *Marine Pollution Bulletin*, March 2015, vol. 92, Iss. 1, pp. 227–232.
15. Fernández R., Fernández-Fuego D., Bertrand A., González A. Strategies for Cd accumulation in *Dittrichia viscosa* (L.) Greuter: role of the cell wall, non-protein thiols and organic acids. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, no. 78, pp. 63–70.
16. Uyanik A., Kutbay H.G. Accumulation of heavy metals in water, sediments and wetland plants of kizilirmak delta (samsun, Turkey). *Journal Phytoremediation*, 2015, no. 17, pp. 66–75.
17. Jing Li, Haixin Yu, Yaning Luan. Meta-Analysis of the Copper, Zinc, and Cadmium Absorption Capacities of Aquatic Plants in Heavy Metal-Polluted Water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, no. 12, pp. 14958–14973.
18. Dayneko N.M., Timofeev S.F. Accumulation of radiocesium and heavy metals by coast-water plants in some areas of Gomel region (Republic of Belarus), near-border with Bryansk region, Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 220–225. In Rus.
19. Dayneko N.M., Timofeev S.F. Estimation of the state of coast-water plants of Gomel region. *Izvestiya Gomelskogo gosudarstvenno-go universiteta*, 2013, no. 5 (80), pp. 63–70. In Rus.
20. Dayneko N.M., Timofeev S.F. *Nakoplenie tyazhelykh metallov pribrezhno-vodnoy rastitelnostyu Gomelskogo regiona* [Heavy metal accumulation by coast-water plants in Gomel region]. Chernigov, Lozovoy Publ., 2014. 208 p.
21. Korchagin A.A. Vidovoy (floristicheskiy) sostav rastitelnykh sobshchestv i metody ego izucheniya [Floristic composition of plant association and methods for its study]. *Polevaya geobotanika* [Field geobotany]. Leningrad, Nauka Publ., 1964. Vol. 3, pp. 39–62.
22. *Opredelitel vysshikh rasteniy Belarusi* [Determination of high plants in Belarus]. Ed. by V.I. Parfenov. Minsk, Dizayn PRO Publ., 1999. 472 p.
23. Gigevich G.S., Vlasov B.P., Vynaev G.V. *Vysshie vodnye rasteniya Belarusi: ekologo-biologicheskaya kharakteristika, ispolzovanie i okhrana* [High water plants of Belarus: ecological and biological features, use and protection]. Minsk, BGU Publ., 2001. 231 p.
24. Rusanov A.K. *Osnovy kolichestvennogo spektralnogo analiza rud i mineralov* [Fundamentals of quantitative spectral analysis of ores and minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 400 p.
25. Alekin O.A., Semenov A.D., Skopintsev B.A. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu vod sushy* [Guidance on chemical analysis of land waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973. 268 p.
26. *Fizicheskie i fiziko-khimicheskie metody analiza pri geokhimicheskikh issledovaniyakh* [Physical and physicochemical methods of analysis at geochemical investigations]. Ed. by V.A. Rudnik, A.A. Smyslov. Leningrad, Nedra Publ., 1986. 262 p.
27. Zaydel A.N. *Osnovy spektralnogo analiza* [Fundamentals of spectral analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 324 p.
28. *Postanovlenie Ministerstva prirodnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus* no. 43/42 ot 8 maya 2007 g. [Resolution of the Ministry of Environmental Resources of the Republic of Belarus, no. 43/42, 8 may 2008]. Available at: [https://www.google.by/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj049fEj\\_LMAhXJXiWKHdaADqEQFgga-MAA&url=http://minzdrav.gov.by/lcfi-les/000127\\_802014\\_N70-139\\_2009.doc&usq=AFQjCNFTanu9zzYX-px15e3mbtdHiyhe-g&bvm=bv.122676328,bs.1,d.bGs](https://www.google.by/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj049fEj_LMAhXJXiWKHdaADqEQFgga-MAA&url=http://minzdrav.gov.by/lcfi-les/000127_802014_N70-139_2009.doc&usq=AFQjCNFTanu9zzYX-px15e3mbtdHiyhe-g&bvm=bv.122676328,bs.1,d.bGs) (accessed 20 January 2016).

Received: 22 February 2016.

#### Information about the authors

**Nikolai M. Dayneko**, Cand. Sc., associate professor, head of the department, F. Skorina Gomel State University.

**Sergey F. Timofeev**, Cand. Sc., associate professor, F. Skorina Gomel State University.

**Svetlana V. Zhadko**, teaching assistant, F. Skorina Gomel State University.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ( $U_{пр.}$ ,  $\Phi_i$ , но  $Al_2O_3$ ,  $\cos\alpha_i$ , max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

### АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

**Петров Иван Иванович**, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

**Иванов Андрей Андреевич**, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 200 слов).

**Ключевые слова:** (ниже ключевые слова на английском языке)

Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2014. – Т. 316. – № 1. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2014).

### REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa** *Д.В. Заремба*  
**Перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Подписано к печати 30.05.2016. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 15,59. Уч.-изд. л. 14,10.  
Заказ 250-16. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ