

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 328, № 2, 2017

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Редакционная коллегия**

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Кирьянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2017

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019  
ISSN (on-line) – 2413-1830

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339  
(без самоцитирования – 0,287)

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей. Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 328, № 2, 2017

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

**Editorial Board**

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Rikhvanov L.P., Dr. Sc. (Russia)  
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)  
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)  
Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)  
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., PhD (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Korobochkin V.V., Dr. Sc. (Russia)  
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)  
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)  
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)  
Rui D., PhD (Portugal)  
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2017

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Способ расчета и возможные изменения подземного стока в Западной Сибири в голоцене** 6  
Моисеева Ю.А., Савичев О.Г.
- Прецессирующая передача для приводов запорной арматуры нефтегазопроводов и редукторных вставок насосов для добычи тяжелых нефтей** 15  
Сызранцев В.Н., Пазяк А.А.
- Высокомолекулярные и низкомолекулярные азотистые основания в высокопарафинистых нефтях** 28  
Аюрова А.М., Герасимова Н.Н., Сагаченко Т.А.
- Бром в почвах Томской области** 36  
Перминова Т.А., Барановская Н.В., Ларатт Б., Жорняк Л.В., Судыко А.Ф.
- Особенности состава самородного золота техногенных россыпей на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла (Приамурье)** 46  
Сафронов П.П., Кузнецова И.В.
- Лабораторное изучение жидкостей, выносимых из скважин, методом ЯМР-релаксометрии** 59  
Шумскайте М.И., Глинских В.Н., Бортникова С.Б., Харитонов А.Н., Пермяков В.С.
- Расчет гидравлических сопротивлений затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора** 67  
Азин А.В., Богданов Е.П., Пономарев С.В., Рикконен С.В.
- Распространенность и генезис сферических зёрен акцессорного псевдуртила в девонских гранитоидах Алейско-Змеиногорского комплекса (СЗ часть Рудного Алтая)** 76  
Новоселов К.Л.
- Геохимические особенности миграционных потоков в зоне влияния горнопромышленного техногенеза (г. Медногорск)** 85  
Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Аминов П.Г.
- Комплексное изучение материалов алюминиевых бурильных труб** 95  
Шакирова А.И., Исмаков Р.А., Аглиуллин А.Х.
- Метод кадастровой оценки лесных земель с представлением результатов в виде геоинформации** 104  
Ковязин В.Ф., Романчиков А.Ю.
- Method of calculation and potential changes in groundwater flow in Western Siberia in Holocene** 6  
Moiseeva Yu.A., Savichev O.G.
- Precessional gears for drives of stop valves of oil and gas pipelines and gearboxes of pumps to produce heavy crude oil** 15  
Syzrantsev V.N., Pazyak A.A.
- High- and low-molecular nitrogenous bases in highly paraffinic oils** 28  
Ayurova A.M., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A.
- Bromine in the soils of Tomsk region** 36  
Perminova T.A., Baranovskaya N.V., Laratte B., Zhornyak L.V., Sudyko A.F.
- Special features of composition of native gold from technogene placers on the example of the Nizhneselemzhinsky gold-bearing node (Priamurye)** 46  
Safronov P.P., Kuznetsova I.V.
- NMR-relaxometry laboratory study of fluids taken from boreholes** 59  
Shumskayte M.Y., Glinskikh V.N., Bortnikova S.B., Kharitonov A.N., Permyakov V.S.
- Calculation of hydraulic resistances of a submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator** 67  
Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V.
- Distribution and genesis of spherical accessory pseudorutile grains in devonian granitoids of Aleysko-Zmeinogorsk complex (N-W Rudni Altai)** 76  
Novoselov K.L.
- Geochemical features of migration flows in the impact zone of mining technogenesis (Mednogorsk)** 85  
Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Aminov P.G.
- Comprehensive studies of aluminum drill pipe materials** 95  
Shakirova A.I., Ismakov R.A., Agliullin A.Kh.
- Method of forestland cadastral evaluation with results presentation as geologic informational** 104  
Kovyazin V.F., Romanchikov A.Yu.

УДК 550.42:57.4

## СПОСОБ РАСЧЕТА И ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ

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

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

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

**Актуальность.** Знание палеогидрогеологических условий является важным фактором в решении задач оценки ресурсов подземных вод и их качества, поисков полезных ископаемых, проектировании полигонов бытовых и промышленных отходов, а также необходимым условием разработки методов долгосрочного прогноза изменений окружающей среды. В решении ряда таких задач для исследуемого региона определяющую роль играют процессы водообмена (общего и подземного).

**Цель исследования:** разработка и обоснование методики палеогидрологических реконструкций подземного стока, построение математической модели на ее основе и выявление долгосрочных изменений подземного стока в Западной Сибири и факторов, их определяющих.

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

**Результаты и выводы.** Предложена методика палеогидрологических реконструкций подземного стока. На основе опубликованных среднемноголетних данных построена математическая модель. Получены выводы о вероятностных изменениях суммарного и подземного стока при пяти различных сценариях изменения температуры воздуха и атмосферного увлажнения. Выявлена зависимость между годовым подземным стоком от суммы атмосферных осадков за тёплый период и коэффициента суммарного стока; на основе этой зависимости разработана и апробирована методика реконструкции подземного стока на примере водосборов рек Чузик (южно-таёжная подзона, элемент речной сети Оби) и Турухан (граница северной тайги и лесотундры, приток Енисея); показано, что увеличение подземного стока возможно при росте атмосферных осадков и при похолодании; уменьшение подземного стока определяется, прежде всего, уменьшением атмосферного увлажнения и ростом заболоченности.

### Ключевые слова:

Подземный сток, палеогидрологические реконструкции, математическое моделирование, Западная Сибирь, атмосферное увлажнение.

### Введение

Знание палеогидрогеологических условий является ключом к решению целого ряда гидрогеологических, геоэкологических, геохимических задач и необходимым условием разработки методов долгосрочного прогноза изменений окружающей среды. В частности, при проектировании объектов нефтегазового комплекса Западной Сибири нужно учитывать очень высокую и прогрессирующую заболоченность региона [1, 2], которая обусловлена сочетанием избыточного увлажнения и слабой дренированности водосборов. Последний фактор, в свою очередь, связан с общим и подземным водообменом, что и определило цель исследования – выявление изменений подземного водного стока. Исследование выполнено в продолжение работ по реконструкции гидрологических условий на двух типовых участках – водосборах рек Чузик (элемент системы Чузик – Парабель – Обь – Карское море; южно-таёжная подзона) и Турухан (элемент системы Турухан – Енисей – Карское море; граница северной тайги и лесотундры). Более подробная характеристика указанных рек приведена в [3].

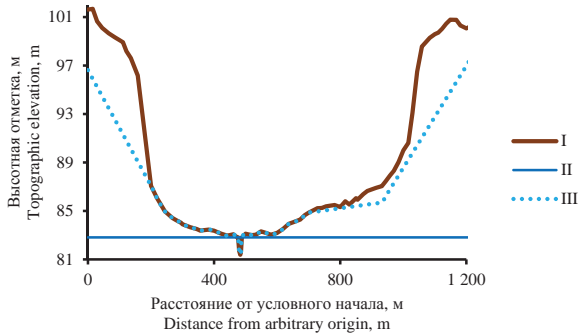
Методика исследования включала в себя три основных этапа: 1) обоснование способа расчёта подземного стока; 2) разработку математической модели подземного стока; 3) реконструкцию подземного стока на основе разработанной модели.

Для апробации модели подземного стока, как и в случае реконструкции суммарного стока рек Чузик и Турухан [3], использовались опубликованные среднемноголетние данные, полученные для 38 средних рек Сибири за условно однородные периоды (средние реки с площадью водосбора от 2000 до 50000 км<sup>2</sup> выбраны с учётом зональных условий формирования их стока). Кроме того, при обосновании способа расчёта подземного стока использованы данные о среднемесячных уровнях подземных вод на режимных скважинах государственной наблюдательной сети в Томской области [4–6], уровнях и расходах вод рек Парабель у с. Новиково, Тым у с. Напас, Кеть у п. Максимкин Яр, Чая у с. Подгорное, Васюган у с. Средний Васюган [7, 8].

### Обоснование способа расчёта подземного стока

В настоящее время проблема оценки современного подземного стока неоднократно поднималась в работах [9–16]. Достаточно часто используется метод расчленения гидрографа, основанный на допущении о равенстве подземного стока и подземной составляющей речного стока, причём обычно в предположении преобладания подпорного режима взаимодействия речных и подземных вод. Однако в долинах равнинных рек Западной Сибири даже с

сильно заболоченными водосборами в ряде случаев наблюдается нисходящий режим. В целом можно отметить, во-первых, сохраняющуюся до сих пор неопределённость соотношения понятий «подземный сток» и «подземная составляющая речного стока» [14]. Во-вторых, подпорный режим в период весеннего половодья в регионе наблюдается только в пойме, в то время как поступление подземных вод в долину обычно приурочено именно к половодьям и паводкам (рис. 1).



**Рис. 1.** Поперечный профиль долины реки Колга (элемент сети Колга–Чижалка–Васюган–Обь); условные обозначения: I – поверхность долины и русла; II – уровень воды в реке Колга (середина июня; спад половодья); III – уровень грунтовых вод (измерения проводились одновременно с измерением уровня речных вод)

**Fig. 1.** Cross-section of Kolga River Valley (Kolga–Chizhapka–Vasyugan–Ob); symbols: I is the surface of the valley and the river course; II is the water level in Kolga River (mid-June); III is the groundwater level

С учётом этого в работе [7] был рассмотрен способ восстановления среднемесячных расходов подземных вод по регрессионным зависимостям от

уровней подземных вод вида (1), которые, в свою очередь, базируются на: 1) использовании формулы Дюпюи; 2) представлении инфильтрации в виде линейной функции уровня подземных вод; 3) допущении, что график зависимости, полученной за зимний период (когда речной сток примерно равен подземному), существенно не меняется в весенний и летне-осенний периоды:

$$Q_{gr(Z)i} = a_0 + a_1 Z_{gr,i} + a_2 (Z_{gr,i}^2 - Z_{r,i}^2), \quad (1)$$

где  $Q_{gr(Z)}$  – расход подземных вод в  $i$ -месяц;  $Z_{gr}$  и  $Z_r$  – уровни подземных и речных вод в  $i$ -месяц;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты регрессии. Апробация этого способа была выполнена ранее в [7] по данным наблюдений за период до 2005–2007 гг. Авторами была уточнена оценка подземного стока в водосборах рек Васюган, Парабель, Чая, Тым, Кеть и соответствующие параметры  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  за счёт использования более длинных рядов (до 2012–2015 гг.) и приводеки к среднемноголетним значениям суммарного стока (табл. 1).

Величины квадрата корреляционного отношения  $R^2$  между измеренными (в зимний период) и вычисленными по уравнению (1) значениями во всех случаях были выше критического значения 0,36 [17, 18], что свидетельствует о возможности использования данного способа оценки подземного стока в качестве базового. Однако у него имеется и существенный недостаток, связанный с отсутствием или ограниченностью во многих случаях гидрогеологических наблюдений. Принимая это во внимание, было проведено сопоставление значений подземного стока в водосборах рек Васюган, Парабель, Чая, Тым, Кеть, полученных по уравнению (1) и в результате линейной интерполяции между

**Таблица 1.** Оценки подземного стока и параметры расчётных уравнений (1)

**Table 1.** Assessment of groundwater flow and the calculated parameters of equations (1)

Река–створ River–cross section	Номер скважины (возраст отложений) Well number (sediment age)	$Q_{gr(II)}$ , м <sup>3</sup> /с (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{gr(Z)}$ , м <sup>3</sup> /с (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{gr(Z)}/Q_{gr(II)}$	Коэффициенты регрессии (1) и погрешности их определения The regression coefficients (1) and errors in their definition			$R^2$
					$a_0 \pm \delta_a$	$a_1 \pm \delta_a$	$a_2 \pm \delta_a$	
р. Васюган – с. Средний Васюган Vasyugan River – Sredniy Vasyugan	169p ( $Q_{II}tb + 2Q_{III}tb$ )	44,3	82,0	1,85	–	4,80±0,82	–0,37±0,08	0,44
р. Парабель – с. Новиково Parabel River – Novikovo	129p ( $P_1lg$ )	23,1	39,7	1,72	–3123,60±196,68	43,87±2,43	–0,17±0,02	0,93
р. Чая – с. Подгорное River Chaya – Podgornoe	94p ( $Q_{III}$ )	41,4	42,3	1,02	–	0,10±0,04	0,10±0,01	0,38
р. Тым – с. Напас River Tym – Napas	156p ( $aQ_{I,II}tb + P_2lt + P_3nm$ )	67,2	102,7	1,53	–6021,27±1258,39	94,41±19,56	1,00±0,39	0,53
р. Кеть – п. Максимкин Яр River Ket – Maksimkin Yar	113p ( $2aQ_{II}tb + N_1$ )	98,3	152,8	1,55	–	68,90±20,99	–0,45±0,10	0,45

Примечание:  $Q_{gr(Z)}$  – расход подземных вод, рассчитанный по зависимости (1);  $Q_{gr(II)}$  – расход подземных вод, рассчитанный по зависимости (2);  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения для уравнения (1); приводека выборочных средних к среднемноголетним значениям проводилась путём умножения на соотношение ( $Q_p/Q_n$ ), где  $Q_p$  – выборочное среднее значение суммарного стока;  $Q_n$  – среднее многолетнее значение суммарного стока по [7].

Note:  $Q_{gr(Z)}$  is the groundwater discharge, calculated from the dependence (1);  $Q_{gr(II)}$  is the groundwater discharge, calculated from the dependence (2);  $R^2$  is the square of correlation relation for (1); selected average dates were reduced to the average long-term values by multiplying by the ratio ( $Q_p/Q_n$ ), where  $Q_p$  is the sample mean total runoff;  $Q_n$  is the long-term average value of the total flow, according to [7].

расходами воды в зимнюю межень (в рассматриваемом регионе – с декабря по март), когда речной сток в первом приближении может рассматриваться как подземный:

$$Q_{gr(i),i} = \begin{cases} Q_{r,12} + (Q_{r,12} - Q_{r,3})(i-3)/9, & i = 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; \\ Q_{r,i}, & i = 1, 2, 3, 12, \end{cases} \quad (2)$$

где  $Q_{gr(i)}$  – расход подземных вод в  $i$ -месяц календарного года;  $Q_r$  – расход воды в реке в  $i$ -месяц. В результате установлено, что соотношение  $Q_{gr(2)}/Q_{gr(i)}$  изменяется в диапазоне от 1,02 до 1,85 (рис. 2), что позволяет использовать уравнение (2) для оценки минимального (базового) подземного стока.

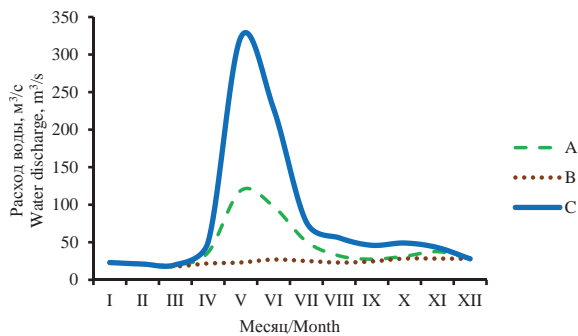


Рис. 2. Гидрограф реки Парабель в створе с. Новиково; условные обозначения: А – расход подземных вод по (1); В – расход подземных вод по (2); С – суммарный расход воды

Fig. 2. Hydrograph of the Parabel River at the cross section in village Novikovo; symbols: A is the groundwater discharge by equation (1); B is the groundwater discharge by equation (2); C is the total water discharge

### Разработка математической модели подземного стока

Для реконструкции подземного стока должна использоваться модель, которая одновременно должна адекватно описывать гидрогеологические условия и основываться на минимуме доступной исходной информации (обычно это – средние за какой-либо период значения температуры атмосферного воздуха и суммы атмосферных осадков, вычисленные косвенно по остаткам растительности, фауны и так далее). С учётом этого допустим, что параметры уравнения (3) могут быть представлены в виде (4–6):

$$Q_{gr,a} = k_f m B J_{gr}, \quad (3)$$

$$m \approx k_1 L J_s \left( \frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2}, \quad (4)$$

$$B \approx \frac{F}{L}, \quad (5)$$

$$\tau \approx \frac{L}{k_3 J_s} \approx \frac{Z_{gr,b} - Z_{gr,e}}{k_4 H_{T>0}^{k_5}}, \quad (6)$$

где  $Q_{gr,a}$  – средний расход подземных вод;  $k_f$  – коэффициент фильтрации;  $B$  – ширина потока подземных;  $F$  – площадь водосбора реки;  $L$  – длина реки;  $J_{gr}$  – напор (уклон подземных вод);  $J_s$  – средневзвешенный уклон реки;  $m$  – мощность водоносного горизонта;  $Y_a$  – средний слой суммарного речного стока;  $H_a$  – средний слой атмосферных осадков;  $H_{T>0}$  – сумма атмосферных осадков за период с положительной температурой атмосферного воздуха;  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  – коэффициенты регрессии;  $Z_{gr,b}$  и  $Z_{gr,e}$  – уровни подземных вод в начале (в замыкающем створе реки) и конце участка (в истоках реки);  $\tau$  – время перемещения водных масс на расстояние  $L$  при падении уровня подземных вод  $\Delta Z_{gr} = Z_{gr,b} - Z_{gr,e}$  ( $J_{gr} \approx \Delta Z_{gr}/L$ ). Тогда уравнение (3) может быть приведено к виду:

$$M_{gr,a} = \frac{Q_{gr,a}}{F} = \frac{k_f k_1 k_4}{k_3} H_{T>0}^{k_5} \left( \frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2} = k_6 H_{T>0}^{k_5} \left( \frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2}, \quad (7)$$

где  $M_{gr,a}$  – средний модуль подземного стока;  $k_6$  – коэффициенты регрессии.

Физический смысл уравнения (7) заключается в выделении зависимости модуля подземного стока от инфильтрационного питания и степени обводнённости горных пород. Инфильтрация наблюдается преимущественно в тёплый период года, а степень обводнённости коррелирует с коэффициентом стока  $Y_a/H_a$ . Апробация модели (7) была выполнена по 38 средним рекам Сибири (с площадью водосбора от 2000 до 50000 км<sup>2</sup>). Сведения об использованной исходной информации приведены в [3]. В результате получены следующие значения параметров модели ( $M_{gr,a}$  в л/(с·км<sup>2</sup>),  $H_{T>0}$ ,  $Y_a$ ,  $H_a$  – в мм/год):  $k_2 = 1,197 \pm 0,123$ ;  $k_5 = 0,268 \pm 0,025$ ;  $k_6 = 1$ ;  $R^2 = 0,76$  (рис. 3).

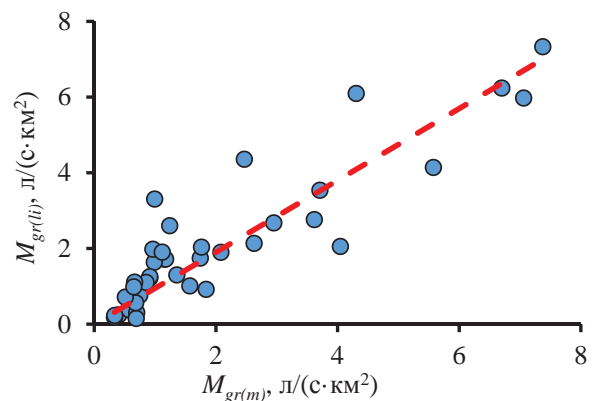


Рис. 3. Соотношение между средними значениями модуля подземного стока  $M_{gr(i)}$ , вычисленными по уравнению (2), и модуля подземного стока  $M_{gr(m)}$ , рассчитанными по уравнению (7)

Fig. 3. Ratio between the average values of the rate of subsurface water flow (specific discharge)  $M_{gr(i)}$  calculated according to the equation (2) and the rate of subsurface water flow  $M_{gr(m)}$  calculated from equation (7)



### Реконструкция подземного стока

Средние значения температуры атмосферного воздуха  $T_a$  и суммы годовых атмосферных осадков  $H_a$  (табл. 2) в разные периоды в течение последних 10000 лет приняты согласно [19–24]. Сумма среднемесячных положительных температур воздуха  $\Sigma T_{>0}$  определялась по зависимости (8), сумма атмосферных осадков за тёплый период – по зависимости (10):

$$\Sigma T_{>0} = 68,197 \exp((0,059 \pm 0,003)T_a); R^2 = 0,80, \quad (8)$$

$$H_{T>0} = \exp(-1,111 \pm 0,361) H_a^{0,844 \pm 0,045} \times (\Sigma T_{>0})^{0,406 \pm 0,036}, R^2 = 0,83, \quad (9)$$

где  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения. Более детально использованная методика восстановления климатической информации и состоянии территорий, соответствующих современным водосборам рек Чузик и Турухан, охарактеризована в [3]. Там же предложена и обоснована методика восстановления среднего (за однородные периоды) слоя суммарного стока  $Y_a$  с использованием следующих формул:

$$Y_a \approx \mu H_a \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \left(1 + \frac{C_{V_H} E_0^2}{2H_a^2}\right); \quad (10)$$

$$E_0 = 0,3080(\Sigma T_{>0})^2 - 0,0021(\Sigma T_{>0})^3, \quad (11)$$

$$\mu = 0,343 \eta^{0,057} (f_F + 1)^{0,278} (f_M + 1)^{-0,108}, \quad (12)$$

$$\eta = \begin{cases} Z_b - 500, & Z_b > 500; \\ 1, & Z_b \leq 500, \end{cases} \quad (13)$$

где  $C_{V_H}$  – коэффициент вариации слоя атмосферного увлажнения;  $f_F$  – лесистость водосбора, %;  $f_M$  – заболоченность водосбора, %; коэффициенты регрессии в (8, 9) и эмпирические коэффициенты в формулах (11, 12) получены методом наименьших квадратов по данным о средних реках бывшего СССР [3];  $Z_b$  – средняя высота водосбора, м (13). Принятые климатические и морфометрические характеристики и результаты расчёта суммарного стока рек Чузик и Турухан и их подземной составляющей приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что в лесотундре и южной тайге Западной Сибири наблюдаются несовпадающие по направлению и абсолютным значениям изменения элементов водного баланса, включая и подземный сток. Однонаправленных изменений суммарного и подземного стока за последние 8000–10000 лет не обнаружено, хотя нельзя не отметить тенденцию увеличения за последние 500 лет суммарного и подземного стока в водосборе реки Турухан в северо-западной части Западно-Сибирской равнины. За тот же период (последние 500 лет) в южно-таёжной подзоне (водосбор реки Чузик) при общем потеплении климата определённый рост суммарного и подземного стока наблюдается только в последние 50–60 лет (табл. 2). Подземная составляющая суммарного

стока реки Чузик изменяется от 18 до 21 %, реки Турухан – от 21 до 25 % (рис. 4).

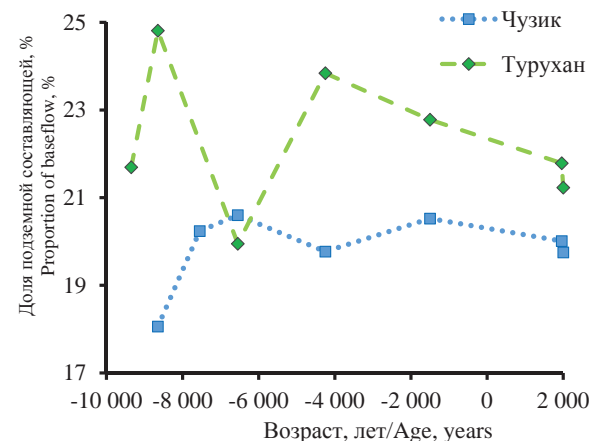
**Таблица 2.** Результаты реконструкции суммарного и подземного стока с территорий, соответствующих водосборам рек Чузик и Турухан

**Table 2.** Results of reconstruction of the total and groundwater runoff from the territories relevant to catchment areas of the Chuzik and Turuhan rivers

Река-створ River-cross section	Расчётный год Hydrological year	$T_a, ^\circ\text{C}$	$H_a$		$f_F$	$f_M$	$Y_Y$	$Y_{gr}$	$Y/H$
			мм/год mm/year	$H(T>0)$					
р. Чузик (с. Осипово) River Chuzik (Osipovo)	-8650	-4,7	548	334	0	0	67	12	0,12
	-7550	-3,0	548	348	10	0	113	23	0,21
	-6550	2,3	455	338	16	4	42	9	0,09
	-4250	0,1	538	369	30	12	83	16	0,15
	-1500	-3,0	548	348	47	22	121	25	0,22
	1960	-1,5	564	370	64	35	117	23	0,21
	2000	-1,2	578	380	68	35	122	24	0,21
р. Турухан (п. Янов Стан) River Turuhan (Yanov Stan)	-9350	-7,4	449	265	0		69	15	0,15
	-8650	-11,2	382	211	0		70	17	0,18
	-6550	-4,2	607	369	11	1	181	36	0,30
	-4250	-6,5	520	306	38		225	54	0,43
	-1500	-5,5	486	296	9		124	28	0,25
	1960	-8,3	610	336	37		331	72	0,54
	2000	-7,7	634	352	38		343	73	0,54

Примечание:  $T_a$  – средняя температура атмосферного воздуха;  $H_a$  – средняя сумма атмосферных осадков за год;  $H_{T>0}$  – сумма атмосферных осадков за период с положительной температурой атмосферного воздуха;  $f_F$  и  $f_M$  – лесистость и заболоченность водосборной территории;  $Y_a$  – средний слой суммарного речного стока;  $Y_{gr,a}$  – средний слой подземного стока.

Note:  $T_a$  is the average temperature of atmospheric air;  $H_a$  is the average sum of atmospheric precipitation for a year;  $H_{T>0}$  is the amount of precipitation at positive air temperature;  $f_F$  and  $f_M$  are the forestness and marshiness of river basin;  $Y_a$  is the average sum of streamflow depth;  $Y_{gr,a}$  is the average groundwater flow depth.



**Рис. 4.** Изменения доли подземного стока на территории водосборов рек Чузик (в створе с. Осипово) и Турухан (в створе п. Янов Стан)

**Fig. 4.** Changing in the proportion of groundwater flow at the total flow in the area of watershed Chuzik (in cross section Osipovo) and Turukhan rivers (in cross section Yanov Stan)

Для более полного понимания взаимосвязей между климатическими, гидрологическими и гидрогеологическими параметрами было выполнено моделирование изменений элементов водного баланса по уравнениям (7–11) при допущении  $\mu \approx 1$  и  $Cv_H \approx 0$  по пяти сценариям: I – увеличение средней температуры воздуха на  $0,3^\circ\text{C}$  и атмосферных осадков на  $14\text{ мм/год}$ ; II – увеличение средней температуры воздуха на  $0,3^\circ\text{C}$  и постоянное атмосферное увлажнение; III – постоянная температура воздуха и увеличение атмосферных осадков на  $14\text{ мм/год}$ ; IV – уменьшение температуры воздуха на  $0,3^\circ\text{C}$  и увеличение атмосферного увлажнения на  $14\text{ мм/год}$ ; V – уменьшение средней температуры воздуха на  $0,3^\circ\text{C}$  и атмосферных осадков на  $14\text{ мм/год}$ .

По результатам расчётов сделан вывод о том, что, во-первых, увеличение подземного стока будет происходить при первом, третьем и четвёртом сценариях изменений климата, причём как при

потеплении, так и при похолодании. Основным условием увеличения подземного стока является рост атмосферного увлажнения, в том числе и за тёплый период. Во-вторых, уменьшение подземного стока вероятно не только при похолодании и аридизации, но и при потеплении, если атмосферное увлажнение существенно не изменится, но возрастёт испарение. В-третьих, доля подземной составляющей в суммарном стоке возрастает только при сценарии одновременного уменьшения температуры воздуха и атмосферных осадков, а при остальных сценариях падает или за счёт общего снижения стока, или вследствие более быстрого роста поверхностной составляющей (табл. 3).

Указанные выше выводы получены без учёта изменений лесистости и заболоченности водосборов, нелинейно связанных с атмосферным увлажнением. В частности, ранее в [3] было показано, что параметр  $\mu$  в уравнениях (10, 12), характеризующий суммарное влияние физико-географиче-

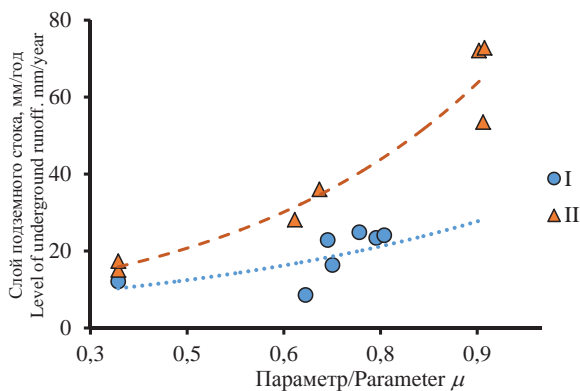
**Таблица 3.** Вероятные изменения испарения ( $E_a$ ), суммарного ( $Y_a$ ) и подземного ( $Y_{gr}$ ) стока реки Чузик при различных сценариях изменения температуры атмосферного воздуха ( $T_a$ ) и атмосферного увлажнения ( $H_a$ )

**Table 3.** Possible changes of evaporation ( $E_a$ ), total ( $Y_a$ ) and underground ( $Y_{gr}$ ) runoff of the Chuzik river under different scenarios of air temperature ( $T_a$ ) and atmospheric moisture ( $H_a$ ) changes

Сценарии изменения Scenarios of changes		Вероятные изменения Possible changes				
Вариант Variant	$T_a, ^\circ\text{C}$	$H_a$	$E_a$	$Y_a$	$Y_{gr}$	$Y_{gr}/Y_a, \%$
		мм/год/мм/year				
I	-2,4	522	370	152	34	22,6
	-2,1	536	379	157	35	22,2
	-1,8	550	389	161	35	21,8
	-1,5	564	398	166	36	21,4
	-1,2	578	407	171	36	21,1
	-0,9	592	417	175	36	20,8
	-0,6	606	426	180	37	20,4
	-0,3	620	435	185	37	20,1
	0,0	634	445	189	38	19,8
	0,3	648	454	194	38	19,5
	0,6	662	463	199	38	19,3
0,9	676	473	203	39	19,0	
II	-2,4	578	388	190	41	21,4
	-2,1		393	185	39	21,3
	-1,8		398	180	38	21,2
	-1,5		403	175	37	21,2
	-1,2		407	171	36	21,1
	-0,9		412	166	35	21,0
	-0,6		416	162	34	21,0
	-0,3		420	158	33	20,9
	0,0		425	153	32	20,8
	0,3		429	149	31	20,7
	0,6		432	146	30	20,7
0,9	436	142	29	20,6		

Сценарии изменения Scenarios of changes		Вероятные изменения Possible changes				
Вариант Variant	$T_a, ^\circ\text{C}$	$H_a$	$E_a$	$Y_a$	$Y_{gr}$	$Y_{gr}/Y_a, \%$
		мм/год/мм/year				
III	-1,2	522	387	135	30	22,2
		536	392	144	32	21,9
		550	397	153	33	21,7
		564	402	162	35	21,4
		578	407	171	36	21,1
		592	412	180	37	20,8
		606	417	189	39	20,6
		620	421	199	40	20,3
		634	425	209	42	20,1
		648	430	218	43	19,8
		662	434	228	45	19,6
		676	438	238	46	19,3
		IV	0,9	522	412	110
0,6	536		415	121	26	21,5
0,3	550		417	133	28	21,3
0,0	564		419	145	31	21,1
-0,3	578		420	158	33	20,9
-0,6	592		421	171	35	20,7
-0,9	606		421	185	38	20,5
-1,2	620		421	199	40	20,3
-1,5	634		420	214	43	20,1
-1,8	648		419	229	46	19,9
-2,1	662		417	245	48	19,7
-2,4	676		415	261	51	19,5
V	0,9		676	473	203	39
	0,6	662	463	199	38	19,3
	0,3	648	454	194	38	19,5
	0,0	634	445	189	38	19,8
	-0,3	620	435	185	37	20,1
	-0,6	606	426	180	37	20,4
	-0,9	592	417	175	36	20,8
	-1,2	578	407	171	36	21,1
	-1,5	564	398	166	36	21,4
	-1,8	550	389	161	35	21,8
	-2,1	536	379	157	35	22,2
	-2,4	522	370	152	34	22,6

ских условий на сток, уменьшается по мере роста атмосферного увлажнения в интервале до 600 мм/год, резко увеличивается в диапазоне от 600 до 750 и менее интенсивно – в диапазоне свыше 750 мм/год. Нелинейные связи отмечены и в случае температуры атмосферного воздуха. Так, в [25] для Западно-Сибирской равнины установлено, что значимое торфообразование начинается при среднегодовой температуре выше минус 7 °С (при температурах воздуха около минус 7 °С и ниже торфяная залежь не формируется, но возможно её сохранение за счёт торфообразования в более тёплый предыдущий период) и достигает максимальных значений при постоянной температуре воздуха около минус 3 °С. В общем случае для исследуемых рек зависимость подземного стока от параметра  $\mu$  приведена на рис. 5.



**Рис. 5.** Зависимость подземного стока рек Чузик (I) и Турухан (II) от параметра  $\mu$  (12), характеризующего суммарное влияние рельефа, лесистости и заболоченности; уравнения связи для: р. Чузик –  $Y_{gr}=5,595\exp(1,777\mu)$ ,  $R^2=0,37$ ; р. Турухан –  $Y_{gr}=6,765\exp(2,490\mu)$ ,  $R^2=0,96$

**Fig. 5.** Ratio of groundwater flow of Chuzik (I) and Turukhan (II) rivers on the parameter  $\mu$  (12), characterizing the total influence of the relief, forest cover and wetlands; Chuzik river –  $Y_{gr}=5,595\exp(1,777\mu)$ ,  $R^2=0,37$ ; Turukhan river –  $Y_{gr}=6,765\exp(2,490\mu)$ ,  $R^2=0,96$

Параметр  $\mu$  уменьшается при росте заболоченности водосбора и возрастает при увеличении лесистости (12). Соответственно, при дальнейшем заболочивании Западно-Сибирской равнины даже при увеличении атмосферного увлажнения подземный сток либо существенно не изменится, либо будет увеличиваться с меньшей скоростью, чем суммарный сток. Болотные экосистемы на определённом этапе развития способны расширяться и при статистически неизменных атмосферных осадках, что, например, наблюдается в настоящее время в восточной части Васюганского болота на границе лесостепи и южной тайги. В таких случаях (при одновременном росте заболоченности и постоянном атмосферном увлажнении) возможно и определённое снижение подземного стока.

## Заключение

Выявлена зависимость годового подземного стока от суммы атмосферных осадков за тёплый период и коэффициента суммарного стока. На основе этой зависимости предложена методика реконструкции подземного стока и собственно его реконструкция на двух типовых участках – водосборах рек Чузик в южно-таёжной подзоне Западной Сибири (элемент системы Чузик–Парабель–Обь) и Турухан на границе северной тайги и лесотундры (элемент системы Турухан–Енисей). Анализ полученных результатов, а также математического моделирования изменений водного баланса по пяти сценариям изменения температуры воздуха и атмосферных осадков показал, что, во-первых, в последние десятилетия наблюдаются наибольшие для голоцена (или близкие к наибольшим) значения подземного стока: 73 мм/год в водосборе реки Турухан; 24 мм/год в водосборе реки Чузик (максимум – 25 мм/год полторы тысячи лет до нашей эры). Минимальное значение годового подземного стока в северо-восточной части Западной Сибири (15–17 мм/год) наблюдалось примерно 10–11 тыс. лет назад, а в южной части современной таёжной зоны (9 мм/год) – примерно 8,5 тыс. лет назад.

Во-вторых, увеличение подземного стока (его абсолютных значений) возможно при росте атмосферного увлажнения как при потеплении, так и при похолодании. Важное значение в таких случаях играет заболоченность и лесистость водосбора: а) рост первого фактора способствует снижению подземного стока, а второго – увеличению; б) рост заболоченности нелинейно зависит от температуры атмосферного воздуха (оптимальный прирост торфяной залежи – примерно при минус 3 °С, при температуре ниже минус 7 °С вероятно в основном только сохранение торфа, образовавшегося при более благоприятных условиях).

В-третьих, вследствие разной чувствительности подземной и поверхностной составляющих суммарного стока к физико-географическим и геологическим условиям доля подземного стока (то есть его относительное значение) наиболее вероятно при сочетании похолодания и уменьшения атмосферных осадков. В-четвёртых, изменения подземного стока на территории Западной Сибири происходят несинхронно вследствие различных условий формирования водного стока, лесных и болотных экосистем. Общая закономерность изменения подземного стока, скорее всего, может быть выявлена только в пределах природной зоны или подзоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (проект № 14.Z50.31.0012), Томского политехнического университета (проект ВИУ\_VAF\_144\_2014), РФФ 17–17–01127.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейштадт М.И. Болота Обь-Иртышского междуречья // Природные условия освоения междуречья Обь-Иртыш / под ред. М.И. Нейштадта, Г.Д. Рихтера. – М.: Институт географии АН СССР, 1972. – С. 322–346.
2. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasuygan Mire, Western Siberia, Russia // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – № 1. – P. 3–15. DOI: 10.1007/s12665-014-3908-z.
3. Савичев О.Г., Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Методика реконструкции зонального водного стока в Западной Сибири в голоцене // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 87–96.
4. Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области // *Геоэкология*. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
5. Состояние геологической среды (недр) на территории Томской области в 2014 г. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», 2015. – Вып. 20. – 84 с.
6. Состояние геологической среды (недр) на территории Томской области в 2015 г. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», 2016. – Вып. 21. – 80 с.
7. Савичев О.Г. Подземная составляющая стока рек бассейна Средней Оби // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 2010. – № 1. – С. 36–39.
8. 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. – P. 111–154.
9. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 343 с.
10. Кусковский В.С. Гидрогеологические условия формирования подземного стока рек Горного Алтая: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1966. – 23 с.
11. Попов О.В. Подземное питание рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 291 с.
12. Hendriks M.R. Introduction to Physical Hydrology. – Oxford; New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
13. Гриневский С.О. Оценка инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод на основе гидрогеологических моделей: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Москва, 2012. – 44 с.
14. Боровский Б.В., Марков М.Л. Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? // *Разведка и охрана недр*. – 2014. – № 5. – С. 10–16.
15. A new approach for continuous estimation of baseflow using discrete water quality data: Method description and comparison with baseflow estimates from two existing approaches / M.P. Miller, H.M. Johnson, D.D. Susong, D.M. Wolock // *Journal of Hydrology*. – 2015. – V. 522. – P. 203–210.
16. Mei Y., Anagnostou E.N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records // *Journal of Hydrology*. – 2015. – V. 523. – P. 636–649.
17. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. – 1970. – V 10. – № 3. – P. 282–290.
18. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982. – 271 с.
19. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 718 с.
20. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 17. Тюменская и Омская области. – СПб.: Гидрометеиздат, 1998. – 702 с.
21. СНиП 23-01-99\*. Строительная климатология. – М.: Госстрой, ГУП ЦПП, 2003. – 162 с.
22. 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.
23. Gajewski K. Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change // *Global and Planetary Change*. – 2015. – V. 128. – P. 14–23.
24. 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.
25. Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. The nonlinear effects based on peat chronology data in paleoclimatic reconstructions // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 43. – P. 1–5.

Поступила 17.01.2016 г.

## Информация об авторах

**Моисеева Ю.А.**, инженер Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НОЦ «Вода» кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.42:57.4

## METHOD OF CALCULATION AND POTENTIAL CHANGES IN GROUNDWATER FLOW IN WESTERN SIBERIA IN HOLOCENE

Yulia A. Moiseeva<sup>1</sup>,  
julchiky@mail.ru

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

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

**The relevance of the research.** Knowledge of paleohydrogeological conditions is the important factor in solving the problems of groundwater resources assessment, mineral exploration, engineering domestic and industrial wastes landfill and prerequisite for development of long-term predicting methods of environmental changes.

**The aim** of research is to develop and substantiate the methods of paleohydrogeological reconstructions of underground water flow and to identify long-term changes of groundwater flow in Western Siberia and the factors that determine them.

**Methods:** geographical and hydrological and statistical methods, mathematical modeling of hydrological and hydrogeological processes.

**Results and conclusions.** The authors have proposed the technique of groundwater runoff paleohydrogeological reconstructions and determined the relationship between the annual underground runoff from amount of precipitation for the warm period and the coefficient of the total flow. Based on this relationship they developed the method of the underground runoff reconstruction and tested it by the example of watersheds of the rivers Chuzik (South taiga subzone, the element of the Ob river synodic) and Turukhan (border of northern taiga and forest tundra, tributary of the Yenisei). It was shown that the increase in groundwater runoff is possible at growth of atmospheric precipitation and climatic cooling. Decrease groundwater runoff is determined by the reduction in atmospheric moistening and growth of waterlogging.

### Key words:

Groundwater runoff, paleohydrogeological reconstructions, mathematical modeling, Western Siberia, atmospheric moistening.

The research was financially supported by the Government of the Russian Federation (project no. 14.Z50.31.0012), Tomsk Polytechnic University (project БУУ\_VAF\_144\_2014), Russian Scientific Fund 17–17–01127.

### REFERENCES

1. Neyshtadt M.I. Bolota Ob-Irtyshskogo mezhdurechya [Bogs of the Ob-Irtysh interfluvial]. *Prirodnye usloviya osvoeniya mezhdurechya Ob-Irtysh* [Natural conditions of the development interfluvies Ob and Irtysh]. Ed. by M.I. Neyshtadt, G.D. Rikhter. Moscow, Institute of Geography AN SSSR Press, 1972. pp. 322–346.
2. 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. DOI: 10.1007/s12665-014-3908-z.
3. Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. Methods of reconstruction of a zonal runoff in Western Siberia in Holocene. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no 5, pp. 87–96. In Rus.
4. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in average seasonal and annual mean levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in Tomsk Region. *Geoecologiya*, 2010, no 1, pp. 23–29. In Rus.
5. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Tomskoy oblasti v 2014 g.* [State of geological environment (subsurface) in Tomsk region in 2014]. Tomsk, Tomskgeomonitoring Publ., 2015. Iss. 20, 84 p.
6. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Tomskoy oblasti v 2015 g.* [State of geological environment (subsurface) in Tomsk region in 2014]. Tomsk, Tomskgeomonitoring Publ., 2016. Iss. 21, 80 p.
7. Savichev O.G. Subsurface runoff in Middle Ob' watershed. *Melioratsiya i vodnoye hozyajstvo*, 2010, no 1, pp. 36–39. In Rus.
8. 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*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. Ch. 4, pp. 111–154.
9. Kudelin B.I. *Printsipy regionalnoy otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles of regional assessment of natural resources of groundwater]. Moscow, MGU Press, 1960. 343 p.
10. Kuskovsky V.S. *Gidrogeologicheskie usloviya formirovaniya podzemnogo stoka rek Gornogo Altaya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Hydro-geological conditions of formation of groundwater flow of Gorny Altai rivers. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1966. 23 p.
11. Popov O.V. *Podzemnoe pitaniye rek* [Groundwater nourishment of rivers]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968. 291 p.
12. Hendriks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
13. Grinevskiy S.O. *Otsenka infiltratsionnogo pitaniya i resursov podzemnykh vod na osnove gidrogeologicheskikh modeley*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Assessment of infiltration recharge and groundwater resources, based on the hydrogeological models. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2012. 44 p.
14. Borevskiy B.V., Markov M.L. Is river low-water flow a measure contributing to underground water or common underground water inflow? *Prospect and protection of mineral resources*, 2014, no. 5, pp. 10–16. In Rus.
15. Miller M.P., Johnson H.M., Susong D.D., Wolock D.M. A new approach for continuous estimation of baseflow using discrete water quality data: Method description and comparison with baseflow estimates from two existing approaches. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 522, pp. 203–210.
16. Mei Y., Anagnostou E.N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 523, pp. 636–649.

17. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10 no. 3, pp. 282–290.
18. Kritskiy S.N., Menkel M.F. *Gidrologicheskie osnovy upravleniya vodokhozyaystvennymi sistemami* [Hydrological foundations of water system management]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 271 p.
19. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1–6. Vyp. 20. Tomskaya, Novosibirskaya, Kemerovskaya oblasti, Altaysky kray* [Scientific and Applied Climate Handbook. Series 3. Long-term data. P. 1–6. Vol. 20. Tomsk, Novosibirsk, Kemerovo Regions, Altai Territory]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. 718 p.
20. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1–6. Vyp. 17. Tyumenskay i Omskaya oblasti* [Scientific and Applied USSR Climate Reference Book. Series. 3. Long-term data. P. 1–6. Vol. 17. Tyumen and Omsk regions]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1998. 702 p.
21. *Stroitel'naya klimatologiya. SNiP 23–01–99\** [Building Climatology. SNiP 23–01–99\*]. Moscow, Gosstroy GUP CPP, 2003. 162 p.
22. 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.
23. Gajewski K. Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change. *Global and Planetary Change*, 2015, vol. 128, pp. 14–23.
24. 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 5ee2). *Quaternary Science Reviews*, 2015, vol. 107, pp. 149–181.
25. Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. The nonlinear effects based on peat chronology data in paleoclimatic reconstructions. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, pp. 1–5.

Received: 17 January 2017.

#### Information about the authors

**Yulia A. Moiseeva**, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

УДК 621.833.2(31)

## ПРЕЦЕССИРУЮЩАЯ ПЕРЕДАЧА ДЛЯ ПРИВодОВ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ И РЕДУКТОРНЫХ ВСТАВОК НАСОСОВ ДЛЯ ДОБЫЧИ ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЕЙ

Сызранцев Владимир Николаевич<sup>1</sup>,

v\_syzrantsev@mail.ru

Пазяк Андрей Александрович<sup>1</sup>,

a.a.pazyak@gmail.com

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения работоспособности и безотказности приводов запорной арматуры в суровых условиях эксплуатации, а также возможности добычи высоковязкой нефти из малодебитных скважин с помощью винтовых насосов или насосов *Herpu Pump*. К настоящему времени выполнены исследования обкатного варианта плоскоконической передачи с двояковыпукловогнутыми по длине зубьями. Процесс нарезания зубьев колес таких передач крайне сложен и трудоемок. Предложена и исследована полуобкатная плоскоконическая передача с прямыми зубьями. Однако отсутствие продольной локализации пятна контакта в этой передаче не позволяет обеспечить требуемую ее несущую способность и работоспособность при наличии погрешностей взаимного расположения звеньев.

**Цель работы:** построение математических моделей процессов формообразования поверхностей зубьев и их зацепления полуобкатной плоскоконической прецессирующей передачи с локализованным контактом.

**Методы исследования:** теория механизмов и машин, теория пространственных передач зацеплением, методы векторной и матричной алгебры, численные методы решения систем трансцендентных уравнений.

**Результаты.** Для приводов нефтегазового оборудования разработана полуобкатная плоскоконическая прецессирующая передача с малым межосевым углом с локализованным контактом в продольном направлении зубьев; построены математические модели процессов формообразования поверхностей зубьев колеса и шестерни; получены зависимости для расчета координат точек контактных линий в передаче и кривизны зуба колеса – основных геометрических характеристик, необходимых для решения задач расчета нагрузочной способности передачи и расчета ее на контактную прочность. Показано, что передача малочувствительна к осевым смещениям шестерни и колеса.

### Ключевые слова:

Полуобкатная плоскоконическая передача, геометрия и кинематика, локализованный контакт, контактные линии, кривизна зуба колеса.

### Введение

Конические и гипоидные зубчатые передачи обеспечивают преобразование крутящего момента и чисел оборотов валов на пересекающихся их осях вращения и являются основным узлом приводов многих различных машин и механизмов. Начало массового производства этих передач относится к двадцатым годам прошлого столетия, когда рядом зарубежных фирм: Gleason, Oerlikon, Klingelberg, были предложены и запатентованы способы формообразования поверхностей зубьев обкатных конических и гипоидных передач, разработаны станки и инструменты, реализующие эти способы. В способе фирмы Gleason [1–4] используется круговая резовая головка, нарезание колес осуществляется методом обката с единичным делением, при этом на производящем колесе зуб имеет круговую форму. По способу фирмы Oerlikon [5–8] нарезание зубьев колес выполняется методом обката с непрерывным делением, резы на резовой головке расположены по спирали, продольный профиль зуба производящего колеса представляет собой циклическую кривую. В исходном варианте способа фирмы Klingelberg [9] инструментом являлась коническая червячная фреза, при нарезании зубьев реализовался метод обката с непрерывным делением, зуб производящего колеса в про-

дольном направлении описан эвольвентой. В конце прошлого века фирмы Oerlikon и Klingelberg объединились, и в настоящее время на зуборезных станках с ЧПУ реализуются различные модификации способа Oerlikon [10–12]. В России нарезание зубчатых колес конических и гипоидных передач выполняется по способу фирмы Gleason, поскольку отечественные зуборезные станки [13], имеющие крайне сложную кинематическую структуру, реализуют лишь этот способ.

За почти вековой период изготовления колес конических и гипоидных передач разработаны многочисленные варианты отмеченных способов, и в настоящее время этот процесс продолжается. Необходимость совершенствования способов нарезания определяется тем, что конические и гипоидные передачи относятся к передачам с приближенным зацеплением и по сравнению с цилиндрическими, червячными, спироидными, глобоидными и другими видами передач имеют наиболее сложную геометрию. Определение с учетом возможностей формообразующих движений на зуборезном станке и параметров применяемого инструмента необходимых геометрических и кинематических характеристик зацепления конической или гипоидной передачи, обеспечивающих требуемую ее нагрузочную способность, контактную и изгибную

прочность зубьев шестерни и колеса, плавность работы передачи под нагрузкой при наличии погрешностей изготовления и сборки элементов передач, является крайне сложной задачей. В общем виде она сводится к задаче прикладного нелинейного программирования – поиску экстремума функции (часто овражного типа) с ограничениями равенств и неравенств. В последние годы определению оптимальной геометрии конических передач, обеспечивающей в условиях эксплуатации требуемую их нагрузочную способность, посвящен ряд работ [14–21]. При этом основной объем научных исследований посвящен ортогональным коническим передачам (межосевой угол  $\Sigma=90^\circ$ ), нарезание зубьев колеса и зубьев шестерни которых осуществляется методом обкатки. Известны лишь, по существу, единичные случаи [22] исследования конических передач с малыми межосевыми углами ( $\Sigma=2^\circ \dots 5^\circ$ ).

Процесс нарезания зубьев колеса и шестерни обкатных конических и гипоидных передач является весьма длительным. Значительное снижение стоимости производства конических передач при их массовом изготовлении на станках фирмы Gleason достигается использованием полуобкатных конических передач [23, 24]. При этом способе нарезание зубьев колеса осуществляется без обкатки. Специалистами фирмы Gleason в этом направлении разработаны способы FORMATE, HELIX-FORM. Несмотря на более сложную задачу поиска оптимальной геометрии [23, 24], технология изготовления таких передач является более прогрессивной.

В ряде механизмов и приводов машин используются конические прямозубые передачи, нарезание зубьев колеса и шестерни которых осуществляется методом обкатки на зубострогальных станках. Важнейшим шагом в повышении производительности нарезания прямозубых конических передач явился способ Revacycle [25], разработанный специалистами фирмы Gleason. Здесь реализуется метод единичного деления, а в качестве инструмента – круговая протяжка. Передача относится к полуобкатной. Процесс нарезания зубьев колес отличается высокой производительностью и поэтому используется в массовом производстве. Геометрия поверхностей зубьев колес по способу Revacycle, как и методика проектирования резцов круговой протяжки, обеспечивающие требуемые геометро-кинематические характеристики передачи, длительное время для отечественных производителей были неизвестны. Впервые вскрытие методик расчета передач, изготовленных по способу Revacycle, осуществлено отечественными учеными [26].

Приводы на основе зубчатых передач применяются в машинах и механизмах самых различных изделий машиностроения. В то же время в нефтегазовой отрасли к ряду приводов оборудования предъявляют требования, которые для других отраслей промышленности критичными не являются. В качестве примера рассмотрим привод че-

тверть оборотного шарового крана, изготавливаемый в настоящее время на основе червячной [27] или спироидной передачи [28, 29]. Несмотря на удачную компоновочную схему, отличные массогабаритные и кинематические характеристики, привод имеет весьма низкий к.п.д. (порядка 30 %), в суровых условиях эксплуатации (при низких температурах, редком включении) крайне высокий момент страгивания, что может привести к невозможности перекрытия трубопровода. Другим примером является редукторная вставка винтового насоса для добычи тяжелой (вязкой) нефти. Данная редукторная вставка представляет собой соосный редуктор [30], передаточное число которого должно находиться в пределах от 10 до 20, при этом радиальные габариты вставки ограничены внутренним диаметром труб, в которых размещается винтовой насос. Несмотря на различные попытки создания редукторной вставки на основе планетарных передач, в том числе передач с зацеплением Новикова, работоспособная конструкция редукторной вставки отсутствует.

Одним из путей совершенствования приводов нефтегазового оборудования, обеспечивающих его работоспособность в вышеотмеченных условиях, является использование в приводах плоскоконических прецессирующих передач [31]. Данные приводы имеют к.п.д. порядка 90 %, широкий диапазон варьирования передаточного отношения (от 10 до 100), вследствие многопарного контакта в зацеплении зубьев высокий передаваемый крутящий момент, по сравнению с передачами червячного типа на порядок меньший момент страгивания.

На рис. 1 представлена 3D модель разработанного на основе плоскоконической передачи соосного редуктора [30], на рис. 2 показаны экспериментальные образцы привода шарового крана ДУ-300 и редукторной вставки [31], основой которых является плоскоконическая передача.

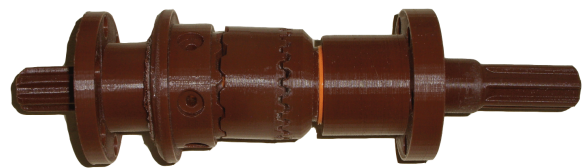


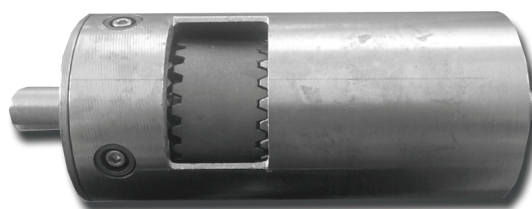
Рис. 1. Модель редукторной вставки к винтовому насосу (корпус снят)

Fig. 1. Prototype of gearbox for screw pump

При начальной разработке плоскоконических передач с малым межосевым углом [32], с целью локализации пятна контакта в зацеплении зубьев, было предложено использовать двояковыпукловогнутую форму зубьев: зубья шестерни в продольном направлении бочкообразные, а зубья колеса корсетобразные (рис. 3).

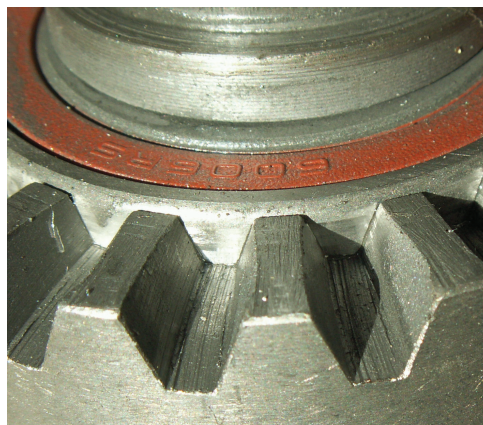
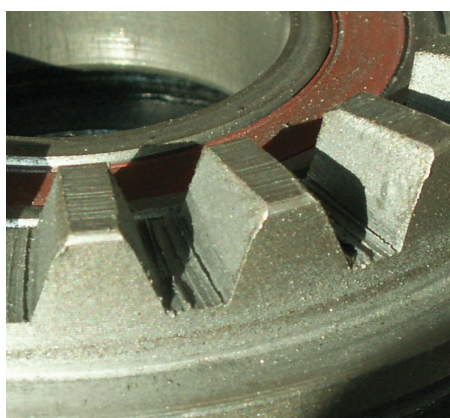
В работе [32] рассмотрена задача геометрического синтеза зацепления плоскоконической передачи, зубья колеса и шестерни которой выполнены





**Рис. 2.** Привод шарового крана и редукторная вставка винтового насоса

**Fig. 2.** Drive for ball valve and gearbox for screw pump



**Рис. 3.** Бочкообразные и корсетообразные зубья

**Fig. 3.** Double-concave and double-convex teeth

либо круговыми, либо являются бочкообразными и корсетообразными. Нарезание зубьев осуществляется методом обката с единичным делением круговыми резовыми головками. Проектирование плоскоконических передач с малым межосевым углом на основе программного комплекса, описанного в работе [32], показало, что в процессе формообразования зуба из-за угла конуса впадин колеса близкого к  $90^\circ$  резовая головка может срезать уже нарезанные зубья (возникает «вторичное резание»). Вследствие чего выбор параметров передачи, которая может быть изготовлена рассмотренным в работе [32] способом, жестко ограничен. Более того, поскольку каждая из сторон бочкообразного (корсетообразного) зуба шестерни и колеса нарезается на зуборезном станке отдельно, то процесс изготовления передачи требует только для чистовой обработки не менее четырех переналадок станка, не говоря уже о высокой квалификации зуборезчика.

С целью снижения затрат на производство плоскоконических передач, упрощения технологии их производства и использования более простых по кинематике зуборезных станков в работах [33,

34] рассмотрена геометрия полуобкатной плоскоконической передачи с прямыми по длине зубьями, контактирующими в зацеплении по линии (рис. 4).

При отсутствии погрешностей изготовления зубьев колеса и шестерни, а также погрешностей взаимного положения шестерни и колеса, передача будет иметь наибольшую нагрузочную способность. В то же время в реальной передаче отмеченные условия не соблюдаются. Вследствие погрешностей изготовления и сборки элементов передачи в зацеплении поверхностей зубьев возникает их перекося, приводящий к концентрации напряжений по длине контактных линий. Кроме этого, в процессе работы зубья колеса и шестерни под действием передаваемой нагрузки деформируются (изгибные и контактные деформации) [35], что не только изменяет кинематику передачи, но и приводит к ударам зубьев при входе в зацепление. С целью снижения влияния отмеченных выше условий контактирования поверхностей зубьев на нагруженность и, в конечном итоге, на несущую способность конических передач в практике их проектирования и изготовления [3, 13, 16] исполь-



Рис. 4. Модель соосного редуктора на основе полуобкатной плоскоконической передачи

Fig. 4. Prototype of coaxial gearbox based on bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion

зуют различные способы модификации поверхностей зубьев как в профильном, так и в продольном направлении. В результате модификации поверхностей зубьев сопряженность конической передачи (передаточная функция) нарушается [13]. Однако, как показано в работах [3, 13], отклонение передаточной функции от постоянной величины, равной передаточному отношению, в геометрически несопряженных конических передачах удаётся значительно уменьшить, если учесть деформации зубьев колеса и шестерни вследствие нагружения их при передаче заданного крутящего момента. Решение данной задачи требует определенной модификации активных поверхностей зубьев, параметры которой определяются в процессе синтеза передачи [3, 11, 13, 23, 24]. Такие передачи, в отличие от сопряженных, носят название передач с приближенным зацеплением. Следует подчеркнуть, что именно приближенные передачи в условиях эксплуатации обладают наибольшей нагрузочной способностью и долговечностью и широко распространены в практике машиностроения.

#### Моделирование процессов формообразования поверхности зуба шестерни и зуба колеса с продольной модификацией полуобкатной плоскоконической передачи

Будем далее использовать нижний индекс 1 для обозначения параметров шестерни, а индекс 2 для обозначения параметров колеса. Следуя работам [33, 34], проекции  $x_2, y_2, z_2$  радиуса-вектора  $\vec{r}_2$  и проекции  $m_{2x}, m_{2y}, m_{2z}$  орта нормали  $\vec{m}_2$  поверхности прямого зуба колеса в системе координат  $S_2(x_2, y_2, z_2)$ , жестко связанной с колесом, описываются выражениями:

$$\begin{aligned} x_2 &= -h_2 \sin \theta_{f_2} - u_2 \cos \theta_{f_2} - r_2; \\ y_2 &= -(t + h_2 \sin \alpha_n); \quad z_2 = h_2 \cos \theta_{f_2} - u_2 \sin \theta_{f_2}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m_{2x} &= -\sin \theta_{f_2} \sin \alpha_n; \quad m_{2y} = \cos \alpha_n; \\ m_{2z} &= \cos \theta_{f_2} \sin \alpha_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u_2, h_2$  – линейные координаты по длине и по профилю зуба колеса;  $\theta_{f_2}$  – угол ножки зуба колеса;  $r_2$  – средний делительный радиус колеса;  $\alpha_n$  – угол профиля исходного производящего контура;  $t$  – половина ширины впадины зуба колеса.

Исходя из способа формообразования поверхность прямого зуба шестерни является [33, 34] огибающей семейства поверхностей зуба колеса (1). Выражения для проекций  $x_1, y_1, z_1$  радиуса-вектора  $\vec{r}_1$  и проекций координат  $m_{1x}, m_{1y}, m_{1z}$  орта нормали  $\vec{m}_1$  поверхности прямого зуба шестерни в системе координат  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ , жестко связанной с шестерней, на основании работы [34] имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \cos \varphi_1 + B_1 \sin \varphi_1; \quad y_1 = -A_1 \sin \varphi_1 + B_1 \cos \varphi_1; \\ z_1 &= \sin \Sigma (f_3 \sin \varphi_2 - f_1 \cos \varphi_2) + \cos \Sigma (f_2 + d) - c; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \arcsin[-C_\varphi (\sqrt{A_\varphi^2 + B_\varphi^2})^{-1}] - \xi;$$

$$\begin{aligned} m_{1x} &= -\sin \theta_{f_2} \sin \alpha_n \times \\ &\times (\cos \varphi_1 \cos \Sigma \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + \\ &+ \cos \alpha_n (-\cos \varphi_1 \cos \Sigma \sin \varphi_2 + \sin \varphi_1 \cos \varphi_2) + \\ &+ \cos \theta_{f_2} \sin \alpha_n \cos \varphi_1 \sin \Sigma; \\ m_{1y} &= -\sin \theta_{f_2} \sin \alpha_n \times \\ &\times (-\sin \varphi_1 \cos \Sigma \cos \varphi_2 + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2) + \\ &+ \cos \alpha_n (\sin \varphi_1 \cos \Sigma \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) - \\ &- \cos \theta_{f_2} \sin \alpha_n \sin \varphi_1 \sin \Sigma; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{1z} &= \sin \theta_{f_2} \sin \alpha_n \sin \Sigma \cos \varphi_2 + \cos \alpha_n \sin \Sigma \sin \varphi_2 + \\ &+ \cos \theta_{f_2} \sin \alpha_n \cos \Sigma, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $u_1, h_1$  – линейные координаты по длине и по профилю зуба шестерни;  $r_1$  – средний делительный радиус шестерни;  $\Sigma$  – межосевой угол в передаче;  $\varphi_2$  – угол поворота колеса в станочном зацеплении;  $\xi$  – вспомогательный угол;  $\varphi_1 = i\varphi_2$  – угол поворота шестерни в станочном зацеплении;  $i = z_2^*/z_1^*$ ;  $z_1^*, z_2^*$  – числа зубьев, соответственно, шестерни и колеса, и введены обозначения:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \cos \Sigma (f_1 \cos \varphi_2 - f_3 \sin \varphi_2) + \sin \Sigma (f_2 + d); \\
 B_1 &= f_3 \cdot \sin \varphi_2 - f_1 \cos \varphi_2; \\
 A_\varphi &= \sin \alpha_n \sin \Sigma (u_1 + d \sin \theta_{f_2} - r_2 \cos \theta_{f_2}); \\
 B_\varphi &= -\sin \Sigma (f_2 \cos \alpha_n - f_3 \sin \alpha_n \cos \theta_{f_2} + d \cos \alpha_n); \\
 C_\varphi &= (i^{-1} - \cos \Sigma) (f_1 \cos \alpha_n + f_3 \sin \theta_{f_2} \cos \alpha_n); \\
 f_1 &= u_1 \cos \theta_{f_2} - h_1 \sin \theta_{f_2} \cos \alpha_n - r_2; \\
 f_2 &= u_1 \sin \theta_{f_2} + h_1 \cos \theta_{f_2} \cos \alpha_n; \quad f_3 = t - h_1 \sin \alpha_n; \\
 c &= r_1 (i^{-1} - \cos \Sigma) (\sin \Sigma)^{-1}; \quad d = r_1 (i \cos \Sigma - 1) (\sin \Sigma)^{-1}.
 \end{aligned}$$

В зависимостях (3) в разрешенном относительно параметра  $\varphi_2$  виде записано уравнение связи параметров  $f(u_1, h_1, \varphi_1) = 0$  (уравнение зацепления [1, 3, 13, 33]). Входящий в это выражение угол  $\xi$  устанавливается исходя из известных значений его тригонометрических функций, рассчитываемых по формулам:

$$\sin \xi = B_\varphi (\sqrt{A_\varphi^2 + B_\varphi^2})^{-1}; \quad \cos \xi = A_\varphi (\sqrt{A_\varphi^2 + B_\varphi^2})^{-1}.$$

На рис. 5 представлена схема формообразования продольной модификации зуба колеса инструментом с прямолинейной кромкой.

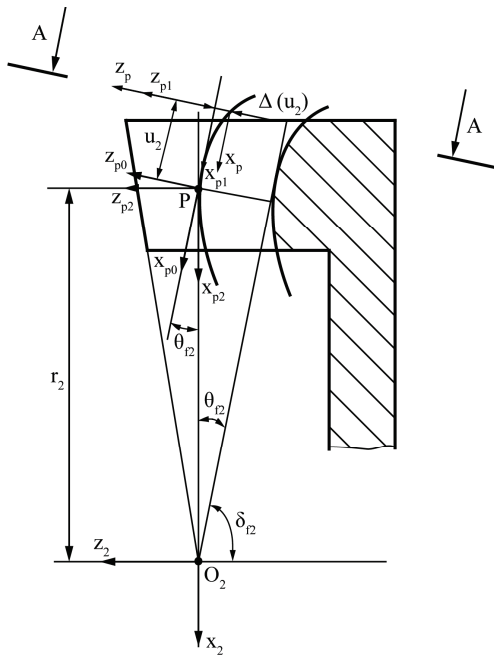


Рис. 5. Расчетная схема и используемые системы координат  
Fig. 5. Design scheme and used coordinate systems

Здесь инструменту с прямолинейной режущей кромкой, точки которой в системе координат  $S_p(x_p, y_p, z_p)$  задаются параметром  $h_2$ , перемещающегося при нарезании прямого зуба на величину параметра  $u_2$  параллельно проекции конуса впадин в плоскости  $z_2 O_2 x_2$ , сообщается дополнительное движение вдоль оси  $z_p$  в соответствии с некоторой функцией  $\Delta(u_2)$  [36]. Требования к этой функции заключаются в следующем. В расчетной точке  $P$  зуба колеса (при  $u_2=0$ ) функция  $\Delta(0)=0$ , а при изменении параметра  $u_2$  как в сторону положительных, так и отрицательных значений, функция

$\Delta(u_2)$  должна плавно возрастать. В результате описанных движений инструмента зуб колеса приобретает бочкообразную форму.

В работе [36] в качестве функциональной зависимости  $\Delta(u_2)$  предложено использовать эллипс, всегда касающийся в плоскости  $z_p O_2 x_p$  (рис. 5) в расчетной точке  $P$  координатной оси  $x_p$ :

$$\begin{aligned}
 \Delta(u_2) &= a \cos \chi_p \{ \cos [\vartheta(u_2)] - \cos \vartheta_p \} + \\
 &+ b \sin \chi_p \{ \sin [\vartheta(u_2)] - \sin \vartheta_p \},
 \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a, b$  – малая и большая полуоси эллипса;  $\vartheta_p$  – угол, нулевое значение которого обеспечивает симметричный вид зависимости  $\Delta(u_2)$ , а при  $\vartheta_p \neq 0$  зависимость  $\Delta(u_2)$  становится несимметричной относительно  $u_2=0$ ;  $\chi_p$  – угол, рассчитываемый по формуле:  $\chi_p = \arctg (atg \vartheta_p / b)$ ; угол  $\vartheta(u_2)$  определяет текущую точку (при  $u_2 = \text{const}$ ) эллипса и рассчитывается по выражению:

$$\begin{aligned}
 \vartheta(u_2) &= \\
 &= \arcsin \frac{u_2 + b \cos \chi_p \sin \vartheta_p - a \sin \chi_p \cos \vartheta_p}{\sqrt{(a \sin \chi_p)^2 + (b \cos \chi_p)^2}} - \xi_u.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Входящий в (6) вспомогательный угол  $\xi_u$  вычисляется на основе значений его тригонометрических функций:

$$\begin{aligned}
 \sin \xi_u &= \frac{-a \sin \chi_p}{\sqrt{(a \sin \chi_p)^2 + (b \cos \chi_p)^2}}; \\
 \cos \xi_u &= \frac{b \cos \chi_p}{\sqrt{(a \sin \chi_p)^2 + (b \cos \chi_p)^2}}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения проекций  $x_2, y_2, z_2$  радиуса-вектора  $\vec{r}_2$  зуба колеса с продольной модификацией, а также проекции  $m_{2x}, m_{2y}, m_{2z}$  орта нормали  $\vec{m}_2$  этой поверхности в системе координат  $S_2(x_2, y_2, z_2)$ , жестко связанной с колесом, описываются более общими, нежели (1) и (2), выражениями [36]:

$$\begin{aligned}
 x_2 &= \sin \theta_{f_2} [\Delta(u_2) - h_2] - u_2 \cos \theta_{f_2} - r_2; \\
 y_2 &= -(t + h_2 \sin \alpha_n); \\
 z_2 &= -\cos \theta_{f_2} [\Delta(u_2) - h_2] - u_2 \sin \theta_{f_2}.
 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 m_{2x} &= -\frac{\sin \alpha_n [\cos \theta_{f_2} \Delta'(u_2) + \sin \theta_{f_2}]}{\sqrt{\sin^2 \alpha_n \{ [\Delta'(u_2)]^2 + 1 \} + \cos^2 \alpha_n}}; \\
 m_{2y} &= \frac{\cos \alpha}{\sqrt{\sin^2 \alpha_n \{ [\Delta'(u_2)]^2 + 1 \} + \cos^2 \alpha_n}}; \\
 m_{2z} &= -\frac{\sin \alpha_n [\sin \theta_{f_2} \Delta'(u_2) - \cos \theta_{f_2}]}{\sqrt{\sin^2 \alpha_n \{ [\Delta'(u_2)]^2 + 1 \} + \cos^2 \alpha_n}},
 \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned}
 \Delta'(u_2) &= a \cos \chi_p \times \\
 &\times \left[ \frac{-e_c (p + u_2) + \sqrt{[e_c (p + u_2)]^2 - n[(p + u_2)^2 - k_c]}}{n} \right] + \\
 &- \cos \vartheta_p
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & +b \sin \chi_p \times \\ & \times \left[ \frac{-e_s(p+u_2) + \sqrt{[e_s(p+u_2)]^2 - n[(p+u_2)^2 - k_s]}}{n} \begin{pmatrix} \mathcal{G}_p \\ \mathcal{G}_p \end{pmatrix} - \right]; \\ & -\sin \mathcal{G}_p \\ & e_c = a \sin \chi_p; k_c = b^2 \sin \chi_p; e_s = b \cos \chi_p; \\ & k_s = a^2 \sin^2 \chi_p; n = a^2 \sin^2 \chi_p + b^2 \cos^2 \chi_p; \\ & p = b \cos \chi_p \sin \mathcal{G}_p - a \sin \chi_p \cos \mathcal{G}_p. \end{aligned} \quad (10)$$

Получим формулы для расчета координат точек сечения поверхности зуба колеса (8) плоскостью  $z_2=0$ . Используя это условие, на основании (8) определим:

$$\begin{aligned} x_2 &= -\frac{u_2 + r_2 \cos \theta_{f2}}{\cos \theta_{f2}}; \\ y_2 &= -\{(t + [\Delta(u_2) + u_2 \operatorname{tg} \theta_{f2}] \sin \alpha_n)\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражения (11) использованы в разработанной в среде MathCad [37] программе, с использованием которой выполнены расчеты (рис. 6) отклонений модифицированной поверхности зуба колеса плоскоконической передачи, имеющей параметры:  $z_1^*=64$ ;  $z_2^*=65$ ; нормальный модуль  $m_n=5$  мм;  $\Sigma=2^\circ$ ; ширина зубчатого венца  $b_w=50$  мм при различных параметрах эллипса функции  $\Delta(u_2)$ : первый вариант (крестики)  $a=10$  мм,  $b=200$  мм,  $\mathcal{G}_p=-1,1$ ; второй вариант (прямоугольники)  $a=10$  мм,  $b=200$  мм,  $\mathcal{G}_p=1,1$ ; третий вариант (кружки)  $a=10$  мм,  $b=50$  мм,  $\mathcal{G}_p=0,01$ .

Функция  $\Delta(u_2)$  для всех трех вариантов задания параметров эллипса (5), с учетом (6) и (7), показана на рис. 7. В соответствии с данной функцией при нарезании колеса, например, на горизонтально фрезерном станке с числовым программным управлением дисковой модульной фрезой, программируется закон перемещения ее центра вращения относительно продольного направления нарезаемой впадины зуба.

Из способа формообразования модифицированной поверхности зуба колеса рис. 5 инструментом с прямолинейной кромкой следует, что одна главная кривизна поверхности зуба равна нулю, а вторая главная кривизна (по длине зуба) может быть рассчитана на основе параметрического представления сечения зуба – кривой в плоскости  $x_2O_2y_2$ , заданной в виде (11).

Следуя работам по аналитической геометрии, если кривая в параметрической форме задана своими координатами (в нашем случае  $x_2(u_2)$ ,  $y_2(u_2)$ ), то ее кривизна определяется по выражению:

$$k(u_2) = \frac{x_2'(u_2)y_2''(u_2) - x_2''(u_2)y_2'(u_2)}{[x_2'(u_2)^2 + y_2'(u_2)^2]^{3/2}}, \quad (12)$$

где  $x_2'(u_2)$ ,  $y_2'(u_2)$  – первые производные по  $u_2$  от координат (11) с учетом зависимости (10);  $x_2''(u_2)$ ,  $y_2''(u_2)$  – вторые производные по  $u_2$  от координат (11).

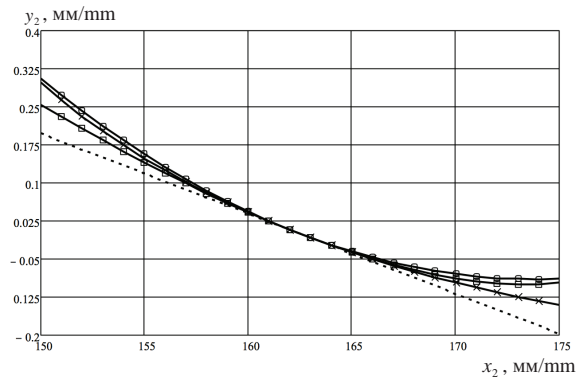


Рис. 6. Продольное сечение прямого (штриховая линия) и модифицированного зуба

Fig. 6. Longitudinal section of straight (dashed line) and modified tooth

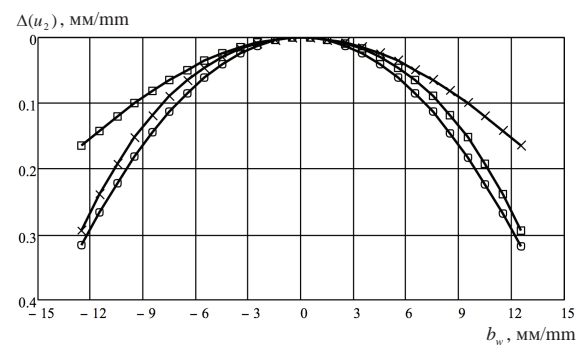


Рис. 7. Функция  $\Delta(u_2)$  для трех вариантов

Fig. 7. Function  $\Delta(u_2)$  for three variants

Путем раскрытия (12) на основе (11) и закона (5) получены конечные зависимости для расчета продольной кривизны модифицированной поверхности зуба колеса, используемые при разработке программы по исследованию его геометрии. На рис. 8 представлены результаты расчета кривизны зуба колеса по его длине при трех вариантах значений параметров функции  $\Delta(u_2)$  рис. 7.

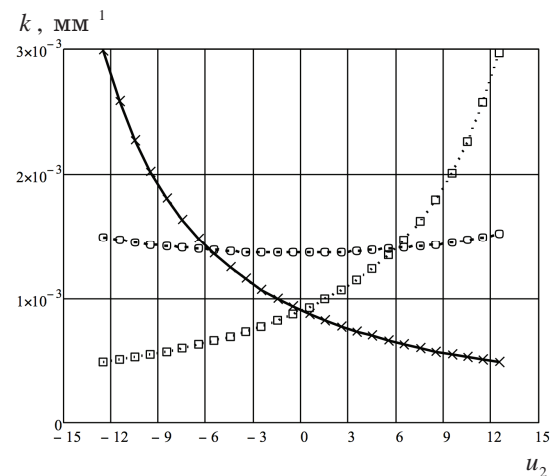


Рис. 8. Изменение кривизны зуба по его длине для трех вариантов функции  $\Delta(u_2)$

Fig. 8. Changing curvature of gear tooth surface along its length for three variants of functions  $\Delta(u_2)$

В практических расчетах достаточно использовать значения продольной кривизны поверхности зуба колеса в ее расчетной точке  $P$  (рис. 5), определяемой параметрами:  $u_2=0$ ;  $\vartheta_p=0$ . Для этого случая выражение (12) имеет вид:

$$k = -\frac{a}{b^2} \frac{\sin \alpha_n \cos^2 \theta_{f_2}}{[1 + \sin^2 \theta_{f_2} \sin^2 \alpha_n]^{3/2}}. \quad (13)$$

Зависимость (13) необходима для построения методики расчета передачи на контактную прочность.

**Математическая модель рабочего зацепления зубьев шестерни и колеса полуобкатной плоскоконической передачи с локализованным контактом**

На рис. 9 показана схема плоскоконической передачи с межосевым углом  $\Sigma$ . В процессе работы передачи шестерня, радиус-вектор поверхности зуба которой  $\vec{r}_1$  описывается зависимостями (3), поворачивается вокруг оси  $z_1$  на угол  $\psi_1$ , при этом колесо поворачивается вокруг оси  $z_2$  на угол  $\psi_2$ . Радиус-вектор  $\vec{r}_2$  поверхности зуба колеса в системе координат  $S_2(x_2, y_2, z_2)$ , жестко с ним связанной, имеет проекции (8). Параметры  $\vartheta_p$ ,  $a$ ,  $b$  формулы (8) на момент решения задачи фиксированы. Их изменение позволяет варьировать форму продольной модификации поверхности зуба колеса с целью локализации контакта в зацеплении зубьев передачи.

При монтаже шестерни и колеса в корпусе редуктора положение центров  $O_1$ ,  $O_2$  систем координат  $S_1(x_1, y_1, z_1)$  и  $S_2(x_2, y_2, z_2)$  может не соответствовать показанному на рис. 9, вызываемое погрешностями взаимного расположения: смещением ( $\Delta_1$ ) шестерни вдоль оси вращения  $z_1$ , смещением колеса ( $\Delta_2$ ) вдоль оси вращения  $z_2$ .

Для учета отмеченных погрешностей значения параметров  $c$  и  $d$  (рис. 9) скорректируем:

$$c^* = c + \Delta_1; \quad d^* = d + \Delta_2; \quad (14)$$

На основе построений (рис. 9) определим элементы  $b_{ij}$ ,  $i=1,4$ ,  $j=1,4$  матрицы перехода  $\tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2)$  от системы координат  $S_2(x_2, y_2, z_2)$  к системе координат  $S_1$ :

$$\begin{aligned} b_{11} &= \cos \psi_1 \cos \Sigma \cos \psi_2 + \sin \psi_1 \sin \psi_2; \\ b_{12} &= -\cos \psi_1 \cos \Sigma \sin \psi_2 + \sin \psi_1 \cos \psi_2; \\ b_{13} &= \cos \psi_1 \sin \Sigma; \quad b_{14} = d^* \cos \psi_1 \sin \Sigma; \\ b_{21} &= -\sin \psi_1 \cos \Sigma \cos \psi_2 + \cos \psi_1 \sin \psi_2; \\ b_{22} &= \sin \psi_1 \cos \Sigma \sin \psi_2 + \cos \psi_1 \cos \psi_2; \\ b_{23} &= -\sin \psi_1 \sin \Sigma; \quad b_{24} = -d^* \sin \psi_1 \sin \Sigma; \\ b_{31} &= -\sin \Sigma \cos \psi_2; \quad b_{32} = \sin \Sigma \sin \psi_2; \\ b_{33} &= \cos \Sigma; \quad b_{34} = d^* \cos \Sigma - c^*; \\ b_{41} &= b_{42} = b_{43} = 0; \quad b_{44} = 1, \end{aligned} \quad (15)$$

где углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  определяют поворот, соответственно, шестерни и колеса вокруг своих осей вращения в передаче.

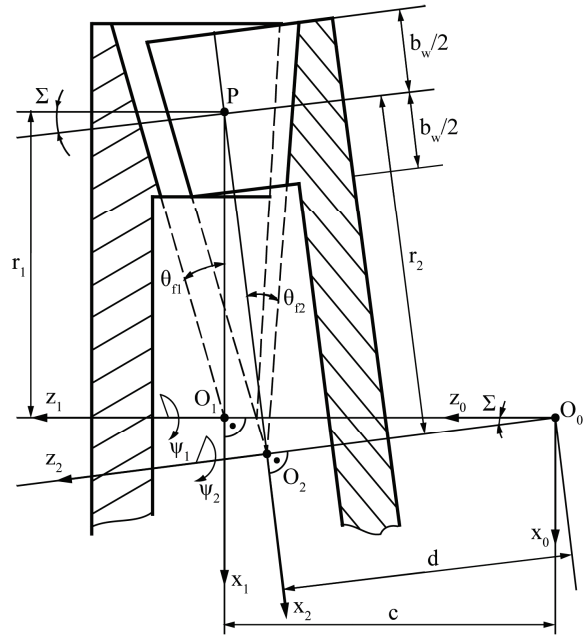


Рис. 9. Схема плоскоконической передачи

Fig. 9. Design scheme of bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion

Если передача является сопряженной, то передаточное отношение в ней постоянное и равное:

$$i^* = \psi_1 / \psi_2 = z_2^* / z_1^*.$$

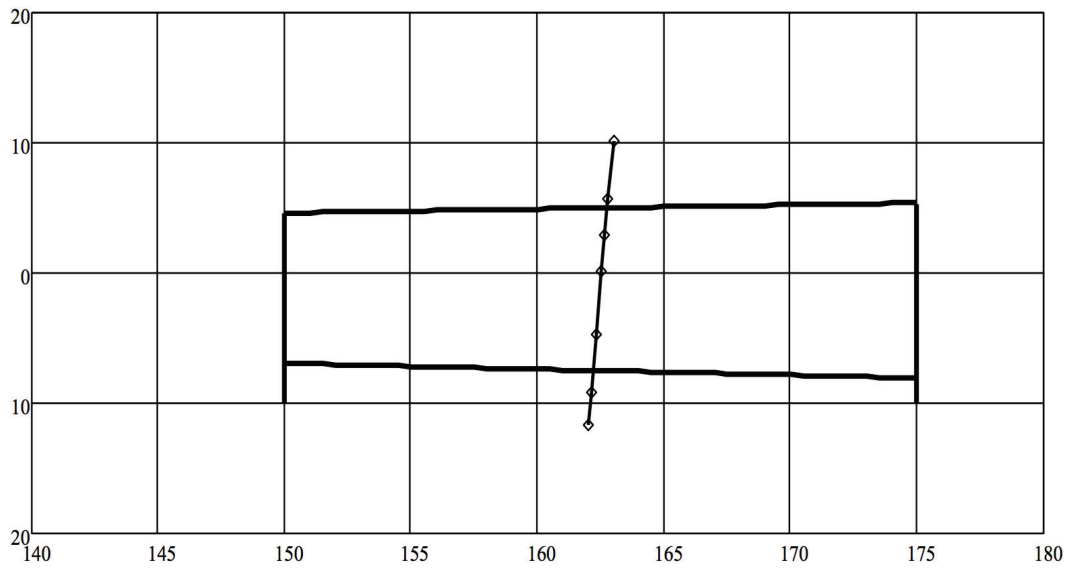
Матрица  $\tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2)$  описывает относительное движение звеньев передачи, если известна зависимость:

$$\psi_2 = \psi_2(\psi_1). \quad (16)$$

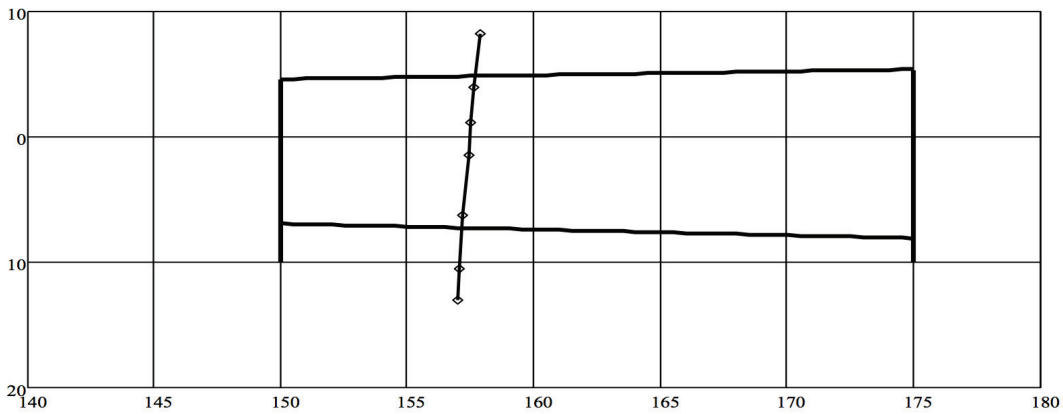
В том случае, когда погрешности  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  равны нулю, а поверхность зуба колеса не модифицируется, по условиям формообразования зубьев шестерни полуобкатной передачи [34], закон (16) обеспечивается кинематикой станка и имеет вид  $\psi_2 = \psi_1 / i^*$ . При наличии погрешностей взаимного положения звеньев плоскоконической передачи или в случае модификации поверхностей зубьев закон (16) устанавливается после определения точек касания (контакта) поверхностей зубьев шестерни и зубьев колеса. При фиксированном параметре  $\psi_1 = \text{const}$  точка контакта в передаче, согласно [1, 3, 13], определяется из решения обратной задачи теории зубчатых зацеплений, на основе следующей системы уравнений.

$$\left. \begin{aligned} \tilde{r}_1(u_1, h_1, \varphi_1) &= \tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2) \tilde{r}_2(u_2, h_2); \\ \tilde{m}_1(\varphi_1) &= \tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2) \tilde{m}_2(u_2); \\ f(u_1, h_1, \varphi_1) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

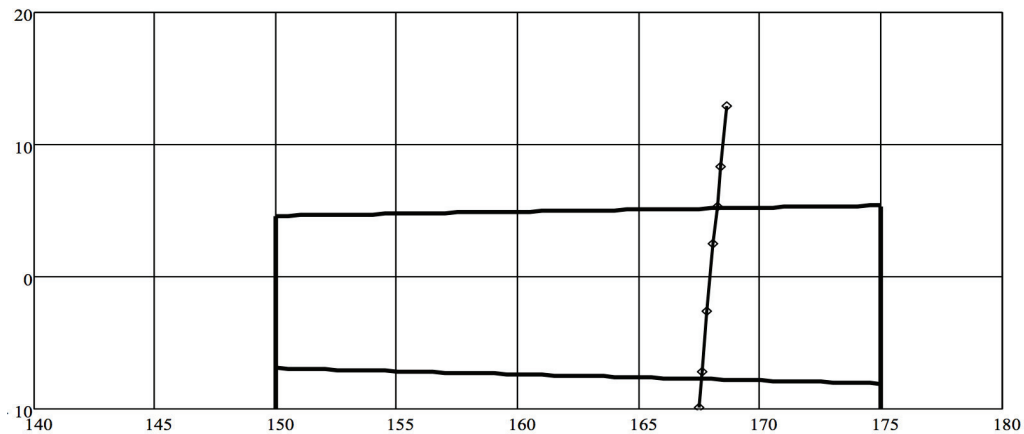
где  $\tilde{r}_1, \tilde{r}_2$  – матрицы-столбцы, составленные из проекций радиус-векторов  $\vec{r}_1$  (3),  $\vec{r}_2$  (8);  $\tilde{m}_1, \tilde{m}_2$  – матрицы-столбцы, составленные из проекций орта нормали поверхности зуба шестерни (4) и поверхности зуба колеса (9); элементы матрицы  $\tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2)$  описываются выражениями (15); последним в системе (17) записано уравнение зацепления (3).



$$\mathcal{G}_p = 0; a = 10 \text{ мм}; b = 100 \text{ мм}$$



$$\mathcal{G}_p = +1,47; a = 10 \text{ мм}; b = 100 \text{ мм}$$



$$\mathcal{G}_p = -1,47; a = 10 \text{ мм}; b = 100 \text{ мм}$$

**Рис. 10.** Положение рабочей линии на поверхности зуба колеса

**Fig. 10.** Position of a line of action on the gear tooth surface

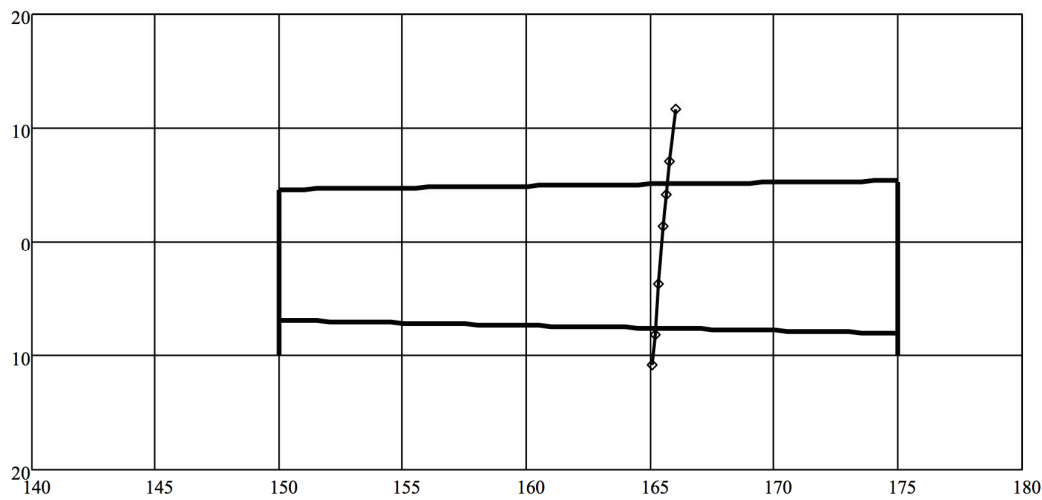
В системе (17) имеем семь уравнений, однако независимыми из них являются только шесть, поскольку по условию равенства двух проекции ортов нормалей третья проекция ортов также будет равна вследствие того, что по модулю орты нормалей равны единице. На основании изложенного, система (17) имеем шесть независимых уравнений, неизвестными в которых являются семь параметров:  $u_1, h_1, \varphi_1, u_2, h_2, \psi_1$  и  $\psi_2$ . Для определения точки контакта в зацеплении на основе решения системы (17) необходимо один из параметров, например  $\psi_1 = \text{const}$ , зафиксировать. Тогда система уравнений (17) трансформируется к виду:

$$\begin{aligned} x_1(u_1, h_1, \varphi_1) &= b_{11}(\psi_2)x_2(u_2, h_2) + \\ &+ b_{12}(\psi_2)y_2(h_2) + b_{13}z_2(u_2, h_2) + b_{14}; \\ y_1(u_1, h_1, \varphi_1) &= b_{21}(\psi_2)x_2(u_2, h_2) + \\ &+ b_{22}(\psi_2)y_2(h_2) + b_{23}z_2(u_2, h_2) + b_{24}; \\ z_1(u_1, h_1, \varphi_1) &= b_{31}(\psi_2)x_2(u_2, h_2) + \\ &+ b_{33}(\psi_2)y_2(h_2) + b_{33}z_2(u_2, h_2) + b_{34}; \end{aligned}$$

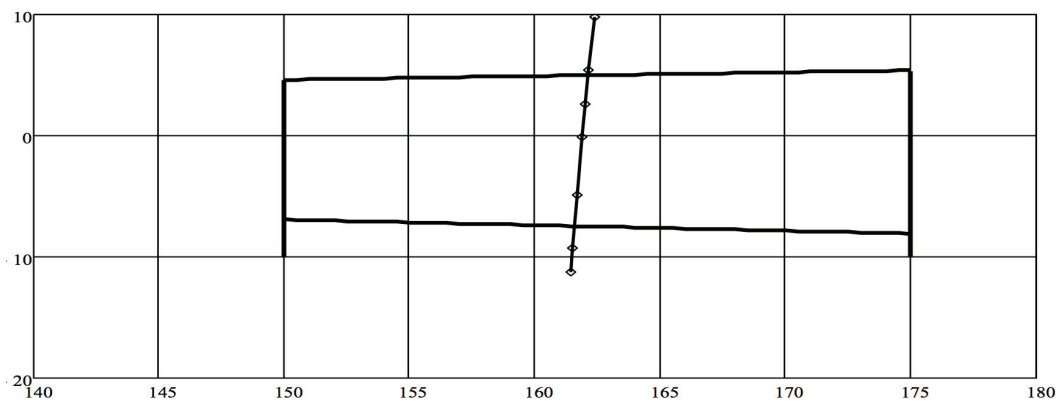
$$\begin{aligned} m_{1x}(\varphi_1) &= b_{11}(\psi_2)m_{2x}(u_2) + \\ &+ b_{12}(\psi_2)m_{2y}(u_2) + b_{13}m_{2z}(u_2); \\ m_{1z}(\varphi_1) &= b_{31}(\psi_2)m_{2x}(u_2) + \\ &+ b_{32}(\psi_2)m_{2y}(u_2) + b_{33}m_{2z}(u_2); \\ f(u_1, h_1, \varphi_1) &= 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Изменяя параметр  $\psi_1$  в пределах углового шага зуба шестерни и решая систему (18), устанавливаются все точки контакта в зацеплении исследуемой полуобкатной плоскоконической передачи, зубья колеса которого изготовлены с продольной модификацией.

Для решения системы (17) в среде MathCAD разработана программа с использованием стандартной подпрограммы Minerr [37]. В качестве примеров расчетов на рис. 10, 11 представлены рабочие линии на поверхности зуба колеса в плоскости параметров  $\rho_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$  и  $z_2$  полуобкатной плоскоконической передачи, имеющей параметры:  $z_1^* = 64, z_2^* = 65, \Sigma = 2^\circ, m_n = 5,0$  мм;  $b_w = 25$  мм.



Параметры:  $\mathcal{G}_p = 0; a = 10$  мм;  $b = 100$  мм;  $\Delta_1 = -0,5; \Delta_2 = 0,0$ .



Параметры:  $\mathcal{G}_p = 0; a = 10$  мм;  $b = 100$  мм;  $\Delta_1 = 0; \Delta_2 = -0,1$ .

Рис. 11. Рабочие линии на поверхности зуба колеса при различных погрешностях взаимного положения элементов передачи

Fig. 11. Lines of action on the gear tooth surface at different transmission errors of mating gears

На рис. 10 показаны рабочие линии при отсутствии погрешностей в передаче ( $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$ ) для трех вариантов продольной модификации поверхности зуба колеса: 1)  $\mathcal{G}_p = 0$ ;  $a = 10$  мм;  $b = 100$  мм; 2)  $\mathcal{G}_p = +1,47$ ;  $a = 10$  мм;  $b = 100$  мм; 3)  $\mathcal{G}_p = -1,47$ ;  $a = 10$  мм;  $b = 100$  мм. Расчеты точек активной действующей линии (рабочей линии в зацеплении) – решение системы трансцендентных уравнений (18), проведенные для фиксированных фаз зацеплений  $\psi_1 = \text{const} = -0,172; -0,1; -0,05; 0,0; 0,1; 0,2; 0,265$ . Из анализа рис. 10 следует, что варьируя величиной параметра модификации  $\mathcal{G}_p$ , можно в передаче управлять положением рабочей линии по длине зуба.

Примеры влияния погрешностей (14) на форму и расположение рабочей линии на поверхности зуба колеса для первого варианта ее модификации показаны на рис. 11. Анализ выполненных исследований показал, что положение рабочей линии слабо зависит от величин погрешностей, хотя расстояние между точками рабочей линии изменяет-

ся. Следствием отмеченного является уменьшение числа пар зубьев, участвующих в контакте. Результаты подобных расчетов необходимы для определения допусков изготовления и сборки передачи.

### Результаты работы

Для приводов нефтегазового оборудования разработана полуобкатная плоскоконическая прецессирующая передача с малым межосевым углом с локализованным контактом в продольном направлении зубьев, построены математические модели процессов формообразования поверхностей зубьев колеса и шестерни, получены зависимости для расчета координат точек контактных линий в передаче и кривизны зуба колеса – основных геометрических характеристик, необходимых для решения задач расчета нагрузочной способности передачи и расчета ее на контактную прочность. Показано, что передача малочувствительна к осевым смещениям шестерни и колеса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litvin F.L., Fuentes A. *Gear Geometry and Applied Theory*. – Cambridge, UK: University Press, 2004. – 800 p.
2. Stadtfeld H.J. *Handbook of Bevel and Hypoid Gears. Calculation–Manufacturing–Optimization*. 1<sup>st</sup> ed. – NY, Rochester Institute of Technology, 1993. – 251 p.
3. Litvin F.L. *Development of Gear Technology and Theory of Gearing*. – Cleveland, Ohio, USA, NASA Reference Publication, 1998. – 124 p.
4. Stadtfeld H.J. *Gleason Bevel Gear Technology. Manufacturing, Inspections and Optimization: Collected Publications 1994/95*. – New York (USA): The Gleason Works, Rochester, 1995. – 202 p.
5. Face Gear Drive with Spur Involute Pinion: Geometry, Generation by a Worm, Stress Analysis / F.L. Litvin, A. Fuentes, C. Zanzi, M. Pontiggia, R.F. Handschuh // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2002. – V. 191. – P. 2785–2813.
6. Kawasaki K. Manufacturing method for large-sized bevel gears in cyclo-palloid system using multi-axis control and multi-tasking machine tool // *Proceedings of International Conference on Gears*. – Munich, VDI-Berichte 2010. – P. 337–348.
7. Du J., Fang Z. An active tooth surface design methodology for face-hobbed hypoid gears based on measuring coordinates // *Mechanism and Machine Theory*. – 2016. – V. 99. – P. 140–154. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.002
8. Shih Y.P., Fong Z.H., Lin G.C.Y. Mathematical model for a universal face hobbing hypoid gear generator // *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*. – 2007. – V. 129(1). – P. 38–47.
9. Lelkes M., Máriaiget J., Play D. Numerical determination of cutting parameters for the control of Klingelnberg spiral bevel gear geometry // *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*. – 2002. – V. 124(4). – P. 761–771.
10. Geometry and investigation of Klingelnberg-type worm gear drive / F.L. Litvin, K. Yukishima, K. Hayasaka, I. Gonzalez-Perez, A. Fuentes // *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*. – 2007. – V. 129(1). – P. 17–22.
11. Shih Y.P., Fong Z.H. Flank modification methodology for face-hobbing hypoid gears based on ease off topography // *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2007. – V. 129(12). – P. 1294–1302.
12. Nishino T. Generation and curvature analysis of face-hobbed hypoid gears // *Proceedings of JSME International Conference on Motion and Power Transmissions*. – Sendai, 2009. – P. 64–69.
13. Лопато Г.А., Кабатов Н.Ф., Сегаль М.Г. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
14. Design and Stress Analysis of Low-Noise Adjusted Bearing Contact Spiral Bevel Gears / A. Fuentes, F.L. Litvin, B.R. Mullins, R. Woods, R.F. Handschuh // *ASME Journal of Mechanical Design*. – 2002. – V. 124. – P. 524–532.
15. Fan Q. Computerized modeling and simulation of spiral bevel and hypoid gears manufactured by Gleason face hobbing process // *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*. – 2006. – V. 128(6). – P. 1315–1327.
16. Modified approach for tooth contact analysis of gear drives and automatic determination of guess values / F. Litvin, G. Sheveleva, D. Vecchiato, I. Gonzalez-Perez, A. Fuentes // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2005. – V. 194. – P. 2927–2946. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cma.2004.07.031>.
17. Simon V. Design of face-hobbed spiral bevel gears with reduced maximum tooth contact pressure and transmission errors // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2013. – V. 26. – Iss. 3. – P. 777–790. DOI: 10.1016/j.cja.2013.05.005.
18. Kolivand M., Kahraman A. An Ease-Off Based Method for Loaded Tooth Contact Analysis of Hypoid Gears Having Local and Global Surface Deviations // *Journal of Mechanical Design*. – 2010. – V. 132. – Iss. 7. – P. 071004–071004–8. DOI: 10.1115/1.4001722.
19. Finite element modelling and the software development for contact analysis of spiral bevel and hypoid gearing / X. Guo, R. Li, Y. Qin, R. Balendra // *Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions, ICMT2001*. – Chongqing, China, 2001. – P. 90–95.
20. Mathematical model and algorithm for contact stress analysis of gears with multi-pair contact / V.I. Medvedev, A.E. Volkov, M.A. Volosova, O.E. Zubelevich // *Mechanism and Machine Theory*. – 2015. – V. 86. – P. 156–171. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.005
21. Medvedev V.I., Matveenkov D.S., Volkov A.E. Synthesis of contact-optimal spiral bevel gears // *Russian Engineering Research*. – 2015. – V. 35. – Iss. 1. – P. 51–56. DOI: 10.3103/S1068798X15010190.
22. Лопатин Б.А., Полуэктов Е.А., Хаустов С.А. Формирование внутреннего приближенного зацепления цилиндрико-конических передач // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия машиностроение. – 2011. – № 11. – С. 62–69.



23. Litvin F.L., Gutman Y. Methods of Synthesis and Analysis for Hypoid Gear Drives of Formate and Helixform // ASME Journal of Mechanical Design. – 1981. – V. 103. – № 1. – P. 83–113.
24. Litvin F.L., Gutman Y. A method of local synthesis of gears based on the connection between the principal and geodetic curvatures of surfaces // ASME Journal of Mechanical Design. – 1981. – V. 103. – P. 114–125.
25. Wildhaber E. Precision bevel gears cut quickly // American Machinist. – 1947. – V. 21. – № 7. – P. 1–7.
26. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. – М.: Станкин, 1999. – 494 с.
27. Набиев Р.М. Червячный редуктор электропривода – пережиток прошлого или актуальная классика // Территория Нефтегаз. – 2010. – № 6. – С. 100–102.
28. Litvin F.L., Petrov K.M., Ganshin V.A. The Effect of Geometrical Parameters of Hypoid and Spiroid Gears on their Quality Characteristics // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1974. – V. 96. – P. 330–334.
29. Спиroidные редукторы трубопроводной арматуры / В.И. Гольдфарб и др. – М.: Вече, 2011. – 222 с.
30. Соосный редуктор: пат. Рос. Федерация № 2529943; заявл. 16.04.2013, опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28. – 8 с.
31. The Design and Production of Drives Based on Pan Precess Gear for Oil and Gas Machinery / V. Syzrantsev, J. Denisov, V. Wiebe, A. Pazyak // ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – Boston, USA, 2015. – V. 10. – P. V010T11A057; 8 pages DOI: 10.1115/DETC2015-47096.
32. Syzrantsev V., Kotlikova V. Mathematical and program provision of design of bevel gearing with small shaft angle // Proceedings of the International Conference on Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems. – UK, 3–6 July, 2000. – P. 13–18.
33. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Pazyak A.A. Calculating geometric parameters of the semi-rolled straight pan gear // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Engineering – SIE 2015. – Belgrade, Serbia, 24–25 September, 2015. – P. 334–337.
34. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Пазяк А.А. Расчет геометрических характеристик полуобкатной прямозубой плоскоконической передачи // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 2. – С. 76–79.
35. Syzrantsev V., Syzrantseva K., Pazyak A. Method of Loading Capacity Calculation of Bevel Precessional Gear for Pipeline Valve Drives // Journal of Engineering and Sciences. – 2015. – V. 10. – Iss. 8. – P. 243–246. DOI: 10.3923/jeasci.2015.243.246.
36. Пазяк А.А., Сызранцев В.Н. Продольная модификация поверхности зуба колеса полуобкатной прямозубой плоскоконической передачи // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 3. – С. 122–129.
37. Дьяконов В. MathCad 2001: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 832 с.

Поступила 19.01.2017 г.

#### Информация об авторах

**Сызранцев В.Н.**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Тюменского индустриального университета.

**Пазяк А.А.**, старший преподаватель кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Тюменского индустриального университета.

UDC 621.833.2(31)

## PRECESSIONAL GEARS FOR DRIVES OF STOP VALVES OF OIL AND GAS PIPELINES AND GEARBOXES OF PUMPS TO PRODUCE HEAVY CRUDE OIL

Vladimir N. Syzrantsev<sup>1</sup>,  
v\_syzrantsev@mail.ru

Andrey A. Pazyak<sup>1</sup>,  
a.a.pazyak@gmail.com

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen,  
38, Volodarskogo street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to provide serviceability and reliability of gearboxes for pipeline valve drives operating under cold conditions and to produce heavy crude oil from stripper wells using screw pumps and Henry Pumps. Bevel gears with a small shaft angle with double-concave-convex teeth have been studied to date. Gear cutting for such gears is extremely complicated and labor-intensive. The authors proposed and studied a straight bevel gear with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion. However, lack of longitudinal localization of the bearing contact does not allow providing the required torque and product reliability in the presence of transmission errors of the mating gears.

**The main aim** of the study is to develop mathematical models of gear tooth surface generating with localized bearing contact and gears mesh of bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion

**The methods used in the study:** theory of mechanisms and machines, theory of gearing, methods of vector and matrix algebra, numerical techniques of the transcendental (nonlinear) equations.

**The results.** The authors developed the bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion for drives of oil and gas equipment. They proposed to manufacture longitudinally crowned gear tooth surfaces; and based on the theory of gearing the authors obtained the relationships describing the gear tooth surface. A program was developed to determine the position of the lines of action in meshing in a gear with the localized contact and curvature of gear tooth surface. This program is a base to calculate the load-carrying capacity and contact stresses of gears. The authors found out that gears are insensitive to position errors of the mating pinion and gear.

### Key words:

Bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion, geometry and kinematics, localized bearing contact, lines of action, curvature of gear tooth surface.

### REFERENCES

- Litvin F.L., Fuentes A. *Gear Geometry and Applied Theory*. Cambridge, UK, University Press, 2004. 800 p.
- Stadtfeld H.J. *Handbook of Bevel and Hypoid Gears. Calculation–Manufacturing–Optimization*. 1<sup>st</sup> ed. NY, Rochester Institute of Technology, 1993. 251 p.
- Litvin F.L. *Development of Gear Technology and Theory of Gearing*. Cleveland, Ohio, USA, NASA Reference Publication, 1998. 124 p.
- Stadtfeld H.J. *Gleason Bevel Gear Technology. Manufacturing, Inspections and Optimization: Collected Publications 1994/95*. New York (USA), the Gleason Works, Rochester, 1995. 202 p.
- Litvin F.L., Fuentes A., Zanzi C., Pontiggia M., Handschuh R.F. Face Gear Drive with Spur Involute Pinion: Geometry, Generation by a Worm, Stress Analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2002, vol. 191, pp. 2785–2813.
- Kawasaki K. Manufacturing method for large-sized bevel gears in cyclo-paloid system using multi-axis control and multi-tasking machine tool. *Proceedings of International Conference on Gears*. Munich, VDI-Berichte, 2010. pp. 337–348.
- Du J., Fang Z. An active tooth surface design methodology for face-hobbed hypoid gears based on measuring coordinates. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 99, pp. 140–154. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.002
- Shih Y.P., Fong Z.H., Lin G.C.Y. Mathematical model for a universal face hobbing hypoid gear generator. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2007, vol. 129 (1), pp. 38–47.
- Lelkes M., Máriaigetzi J., Play D. Numerical determination of cutting parameters for the control of Klingelnberg spiral bevel gear geometry. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2002, vol. 124 (4), pp. 761–771.
- Litvin F.L., Yukishima K., Hayasaka K., Gonzalez-Perez I., Fuentes A. Geometry and investigation of Klingelnberg-type worm gear drive. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2007, vol. 129 (1), pp. 17–22.
- Shih Y.P., Fong Z.H. Flank modification methodology for face-hobbing hypoid gears based on ease off topography. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2007, vol. 129 (12), pp. 1294–1302.
- Nishino T. Generation and curvature analysis of face-hobbed hypoid gears. *Proceedings of JSME International Conference on Motion and Power Transmissions*. Sendai, 2009. pp. 64–69.
- Lopato G.A., Kabatov N.F., Segal M.G. *Konicheskie i gipoidnye peredachi s krugovymi zubyami* [Bevel and hypoid gears with spiral teeth]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 423 p.
- Fuentes A., Litvin F.L., Mullins B.R., Woods R., Handschuh R.F. Design and Stress Analysis of Low-Noise Adjusted Bearing Contact Spiral Bevel Gears. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2002, vol. 124, pp. 524–532.
- Fan Q. Computerized modeling and simulation of spiral bevel and hypoid gears manufactured by Gleason face hobbing process. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2006, vol. 128 (6), pp. 1315–1327.
- Litvin F., Sheveleva G., Vecchiato D., Gonzalez-Perez I., Fuentes A. Modified approach for tooth contact analysis of gear drives and automatic determination of guess values. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, vol. 194, pp. 2927–2946. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cma.2004.07.031>.
- Simon V. Design of face-hobbed spiral bevel gears with reduced maximum tooth contact pressure and transmission errors. *Chi-*

- nese *Journal of Aeronautics*. – 2013, Vol. 26, Iss. 3, pp. 777–790. DOI: 10.1016/j.cja.2013.05.005.
18. Kolivand M., Kahraman A. An Ease-Off Based Method for Loaded Tooth Contact Analysis of Hypoid Gears Having Local and Global Surface Deviations. *Journal of Mechanical Design*, 2010, vol. 132, Iss. 7, pp. 071004–071004–8. DOI: 10.1115/1.4001722.
  19. Guo X., Li R., Qin Y., Balendra R. Finite element modelling and the software development for contact analysis of spiral bevel and hypoid gearing. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions, ICMT'2001*. Chongqing, China, 2001. pp. 90–95.
  20. Medvedev V.I., Volkov A.E., Volosova M.A., Zubelevich O.E. Mathematical model and algorithm for contact stress analysis of gears with multi-pair contact. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, vol. 86, pp. 156–171. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.005.
  21. Medvedev V.I., Matveenkov D.S., Volkov A.E. Synthesis of contact-optimal spiral bevel gears. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, Iss. 1, pp. 51–56. DOI: 10.3103/S1068798X15010190.
  22. Lopatin B.A., Poluektov E.A., Khaustov S.A. Formation of an approximate internal toothing for cylindrical-conic gears. *Bulletin of South Ural State University. Series mechanical engineering*, 2011, no. 11, pp. 62–69. In Rus.
  23. Litvin F.L., Gutman Y. Methods of Synthesis and Analysis for Hypoid Gear Drives of Formate and Helixform. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1981, vol. 103, no. 1, pp. 83–113.
  24. Litvin F.L., Gutman Y. A method of local synthesis of gears based on the connection between the principal and geodetic curvatures of surfaces. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1981, vol. 103, pp. 114–125.
  25. Wildhaber E. Precision bevel gears cut quickly. *American Machinist*, 1947, vol. 21, no. 7, pp. 1–7.
  26. Sheveleva G.I. *Teoriia formoobrazovaniia i kontakta dvizhushchikh tel* [The theory of formation and contact of the moving bodies]. Moscow, Stankin Publ., 1999, 494 p. Книга
  27. Nabiev R.M. Cherviachny reduktor elektroprivoda – perezhitok proshlogo ili aktualnaya klassika [Screw gear motor is a relic of the past or current classical]. *Territorii neftegaz – Oil and gas territory*, 2010, no. 6, pp. 100–102.
  28. Litvin F.L., Petrov K.M., Ganshin V.A. The Effect of Geometrical Parameters of Hypoid and Spiroid Gears on Their Quality Characteristics. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1974, vol. 96, pp. 330–334.
  29. Goldfarb V.I. *Spiroidnye reduktory truboprovodnoy armatury* [Spiroid Gearboxes for Pipeline Valves]. Moscow, Veche Publ., 2011. 222 p.
  30. Denisov Yu.G., Syzrantsev V.N., Vibe V.P. *Soosny reduktor* [Coaxial gearbox]. Patent RF, no. 2529943, 2014.
  31. Syzrantsev V., Denisov J., Wiebe V., Pazyak A. The Design and Production of Drives Based on Pan Precess Gear for Oil and Gas Machinery. *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Boston, USA, 2015. Vol. 10, pp. V010T11A057, 8 pages. DOI: 10.1115/DETC201547096.
  32. Syzrantsev V., Kotlikova V. Mathematical and program provision of design of bevel gearing with small shaft angle. *Proceedings of the International Conference on Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems*. UK, 3–6 July, 2000. pp. 13–18.
  33. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Pazyak A.A. Calculating geometric parameters of the semi-rolled straight pan gear. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Engineering – SIE 2015*. Belgrade, Serbia, 24–25, September, 2015. pp. 334–337.
  34. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Pazyak A.A. Calculating geometric parameters of the semi-rolled straight pan gear. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2015, no. 2, pp. 76–79. In Rus.
  35. Syzrantsev V., Syzrantseva K., Pazyak A. Method of Loading Capacity Calculation of Bevel Precessional Gear for Pipeline Valve Drives. *Journal of Engineering and Sciences*, 2015, vol. 10, Iss. 8, pp. 243–246. DOI: 10.3923/jeasci.2015.243.246.
  36. Pazyak A.A., Syzrantsev V.N. Longitudinal crowning of the gear tooth surface of straight bevel gears with a small shaft angle with non-generated gear and generated pinion. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2016, no. 3, pp. 122–129. In Rus.
  37. Dyakonov V. *MathCad 2001: spetsialny spravochnik* [MathCad 2001: special reference]. St-Petersburg, Piter Publ., 2002. 832 p.

Received: 19 January 2017.

#### Information about the authors

**Vladimir N. Syzrantsev**, Dr. Sc., professor, Honorary worker of science of the Russian Federation, head of the department, Industrial University of Tyumen.

**Andrey A. Pazyak**, senior lecturer, Industrial University of Tyumen.

УДК 665.61:(547.83.+547.73)

## ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ И НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ АЗОТИСТЫЕ ОСНОВАНИЯ В ВЫСОКОПАРАФИНИСТЫХ НЕФТЯХ

Аюрова Анара Майрамбековна<sup>1</sup>,  
dm@ipc.tsc.ru

Герасимова Наталья Николаевна<sup>1</sup>,  
dm@ipc.tsc.ru

Сагаченко Татьяна Анатольевна<sup>1</sup>,  
dissovet@ipc.tsc.ru

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

Актуальность работы обусловлена важностью накопления и систематизации данных о составе и содержании азотсодержащих компонентов в высокопарафинистых нефтях для создания эффективных технологий их добычи, транспорта и переработки.

**Цель работы:** изучение особенностей состава и распределения высокомолекулярных и низкомолекулярных азотсодержащих оснований в нефтях, обогащенных твердыми парафинами.

**Методы исследования:** анализ элементного и функционального состава, осаждение газообразным хлористым водородом, сернокислотная экстракция, жидкостно-адсорбционная хроматография на модифицированных сорбентах, инфракрасная спектроскопия, спектроскопия ядерного магнитного резонанса, хромато-масс-спектрометрия.

**Результаты.** Изучено распределение и состав высокомолекулярных и низкомолекулярных азотистых оснований в высокопарафинистых нефтях, различающихся содержанием твердых парафинов, смолисто-асфальтеновых веществ и основного азота. Установлено, что в высокопарафинистых нефтях присутствуют высокомолекулярные основания со слабо- и сильноразвитым алкильным замещением и низкомолекулярные основания. Выявлены сходства и различия в составе и распределении азотистых оснований в высокопарафинистых и малопарафинистых нефтях. Особенностью оснований высокопарафинистых нефтей является преобладание высокоалкилированных структур. Показано, что высокомолекулярные и низкомолекулярные азотистые основания высокопарафинистых и малопарафинистых нефтей имеют близкие значения структурных характеристик. Средние молекулы высокомолекулярных малоалкилированных оснований, обогащенные ароматическими (4–9) и насыщенными (8–13) циклами, содержат преимущественно 4–5 метильных заместителей. Высокоалкилированные основания имеют меньшее число насыщенных (4–5) и ароматических (3–5) циклов и содержат 19–38 алкильных углеродных атомов, распределенных по 4–5 заместителям с длиной цепи более 4 углеродных атомов. Среди низкомолекулярных азотистых оснований высокопарафинистых и малопарафинистой нефтей идентифицированы  $C_3-C_8$  хинолины,  $C_1-C_6$  бензохинолины,  $C_1-C_6$  дибензохинолины,  $C_1-C_6$  азапирены.

### Ключевые слова:

Высокопарафинистая нефть, высокомолекулярные и низкомолекулярные азотистые основания, состав, распределение.

### Введение

В последние годы в общем объеме запасов жидких углеводородов наблюдается неуклонное увеличение доли нефтей, обогащенных твердыми парафинами (П) [1, 2]. Переход к нетрадиционному сырью требует создания новых и усовершенствования существующих технологий его добычи, транспорта и переработки. Эффективное решение этих задач в значительной степени зависит от объема и глубины информации о составе и свойствах всех компонентов высокопарафинистых нефтей. В настоящее время исследования в этом направлении ограничены главным образом характеристикой высокомолекулярных алканов и асфальтеновых веществ, участвующих в образовании асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), присутствие которых в нефтяных системах негативно влияет на процессы их добычи и транспорта [3–5]. В научной литературе практически отсутствуют данные об особенностях состава и структуры гетероатомных компонентов высокопарафинистых нефтей, в частности азотсодержащих оснований (АО), хотя известно, что они оказывают суще-

ственное влияние на поведение нефтяной дисперсной системы в природных и техногенных условиях [6–12]. Так, сорбируясь на породах, АО снижают эффективность методов, применяемых для повышения нефтеотдачи пластов [6]. Высокомолекулярные АО участвуют в формировании АСПО [7], а низкомолекулярные АО значительно осложняют протекание процессов каталитической переработки дистиллятных фракций и ухудшают качество и эксплуатационные характеристики товарных нефтепродуктов [8–12].

В предлагаемой работе изучены АО высокопарафинистых нефтей с различным содержанием П и смолисто-асфальтеновых веществ (САВ). Такой выбор объектов исследования позволяет выявить связь между распределением в нефтях высокомолекулярных углеводородов и АО и определить особенности состава АО смолистых компонентов высокопарафинистых нефтей, которые, наряду с П и асфальтенами, активно участвуют в образовании АСПО. Полученные данные сопоставляли с результатами сравнительного изучения АО малопарафинистой нефти.

### Объекты и методы исследования

Исследования выполнены на высокопарафинистых нефтях Западной Сибири (месторождения Южно-Табаганское и Фестивальное, образцы № 1 и 2 соответственно), Урало-Поволжья (месторождение Мамуринское, образец № 3), Германии (месторождения Эмлиххайм и Ландау, образцы № 4 и 5) и Казахстана (месторождение Ацисай, образец № 6). Нефтяные флюиды сосредоточены в неоднородных, сложно построенных коллекторах на основе карбонатов, алевролитов, глин и песчаников [13–18]. В качестве нефти сравнения использовали малопарафинистую нефть Крапивинского месторождения (образец № 7) Западной Сибири из терригенных отложений [19]. Все месторождения находятся в промышленной разработке и играют значительную роль в структуре нефтяных запасов соответствующих нефтеносных провинций и стран [13–19].

Изученные высокопарафинистые нефти представлены малосмолистыми (САВ < 10 % мас., образцы № 1, 2, 5) и высокосмолистыми (САВ > 15 % мас., образцы № 3, 4, 6) объектами, существенно различающимися по содержанию П (9,2...20,9 % мас.) и основного азота (Носн., 0,01...0,08 % мас.) (табл. 1). Малопарафинистая смолистая нефть сравнения (образец № 7) по содержанию Носн. является типичным представителем нефтей Западной Сибири [20, 21].

Таблица 1. Характеристика нефтей

Table 1. Characteristic of oils

№ образца нефти Oil sample No.	Массовая доля, %/Mass fraction, %			
	Ппарафины Paraffins	Смолы Resinous	Асфальтены Asfaltens	N <sub>осн.</sub> N <sub>bas.</sub>
Высокопарафинистые нефти/High-paraffinic oils				
1	9,2	6,5	1,2	0,02
2	10,7	7,4	0,2	0,01
3	20,9	14,3	1,1	0,08
4	10,0	23,7	0,6	0,05
5	13,3	7,0	1,2	0,02
6	18,9	18,1	0,5	0,07
Малопарафинистая нефть/Low-paraffinic oil				
7	1,6	8,8	2,6	0,03

АО выделяли из деасфальтизированных образцов нефтей в соответствии со схемой, включающей осаждение высокомолекулярных оснований газообразным хлористым водородом (К-1), экстракцию низкомолекулярных АО уксуснокислым раствором серной кислоты (К-2) и концентрирование высокомолекулярных АО, не осаждаемых HCl, методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на оксиде кремния, импрегнированном соляной кислотой (К-3) [22, 23]. Соединения К-1 разделяли методом горячей экстракции на растворимые (К-1гр) и нерастворимые (К-1гнр) в гексане компоненты [24], соединения К-2 – методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на оксиде кремния, импрегнированном КОН, на азот-

азоткислородсодержащие структуры (К-21 и К-22, соответственно) [23].

Анализ концентратов АО и продуктов их разделения осуществляли с привлечением оборудования центра коллективного пользования Томского научного центра СО РАН.

Элементный состав образцов определяли с использованием CHNS-анализатора «Vario EL Cube», содержание основного азота (N<sub>осн.</sub>) – методом неводного потенциометрического титрования [25], средние молекулярные массы (ММ) – методом криоскопии в бензоле [26].

ИК спектры получали на ИК-Фурье спектрометре «Nicolet 5700» в области 4000...400 см<sup>-1</sup>. Образцы растворяли в CCl<sub>4</sub>, наносили на пластинки из KBr, полученные пленки высушивали.

Спектры <sup>1</sup>H ЯМР регистрировали на спектрометре ЯМР-Фурье «AVANCE AV 300» фирмы «Bruker» при 300 МГц в растворах CDCl<sub>3</sub>. Внутренний стандарт – тетраметилсилан.

Совокупность данных о распределении протонов в <sup>1</sup>H ЯМР спектрах, элементном составе и средних молекулярных массах образцов использовали для расчета средних структурных параметров молекул АО [27, 28].

Хромато-масс-спектрометрический (ГХ-МС) анализ АО осуществляли на DFS приборе «Thermo Scientific». В газовом хроматографе использовали кварцевую капиллярную колонку TR5MS длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм. Хроматографирование проводили в режиме программированного подъема температуры от 80 до 300 °С со скоростью 4 град/мин и выдержкой в течение 30 мин при конечной температуре. Газ носитель – гелий. Сканирование масс-спектров осуществлялось каждую секунду в диапазоне масс до 500 а.е.м. Результаты ХМС анализа обрабатывали с помощью программы Xcalibur. Для идентификации индивидуальных соединений использовали компьютерную библиотеку масс-спектров NIST 02 и литературные данные [29–31]. Относительную распространенность каждого отдельного соединения оценивали как отношение его содержания к суммарному содержанию всех идентифицированных соединений.

### Результаты и их обсуждение

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, количества высокомолекулярных (К-1, ММ=793...949 а.е.м.) и низкомолекулярных (К-2, ММ=354...368 а.е.м.) оснований, выделенных из высокопарафинистых нефтей, изменяются в широких пределах (0,05...1,70 и 0,02...0,15 % мас. соответственно), но во всех случаях они ниже, чем из малопарафинистой нефти сравнения (2,05 и 0,23 % мас. соответственно). Степень извлечения N<sub>осн.</sub> из высокопарафинистых нефтей в указанные концентраты также варьирует в широких интервалах. При этом малосмолистые образцы № 1, 2, 5 характеризуются более высокими относительными количествами выделенного основного азота,

чем высокосмолистые – № 3, 4, 6. Максимальное относительное количество  $N_{осн.}$  выделено в составе АО К-1 и К-2 малопарафинистой нефти сравнения.

Для большинства высокопарафинистых нефтей и для малопарафинистой нефти доля основного азота, связанного с высокомолекулярными АО, выше, чем с низкомолекулярными. Исключение составляют наиболее смолистые образцы № 4 и 6, среди выделенных оснований которых преобладают низкомолекулярные соединения. Такое различие может быть связано с химической природой данных нефтей [16, 18].

**Таблица 2.** Выделение высокомолекулярных и низкомолекулярных азотистых оснований

**Table 2.** Allocation of the high- and low-molecular nitrogenous bases

№ образца нефти Oil sample No.	К-1		К-2	
	Массовая доля, % Mass fraction, %	Доля $N_{осн.}$ нефти, % Fraction of $N_{bas. oil}$ , %	Массовая доля, % Mass fraction, %	Доля $N_{осн.}$ нефти, % Fraction of $N_{bas. oil}$ , %
1	0,66	24,8	0,11	8,5
2	0,60	13,3	0,02	2,3
3	0,30	3,5	0,12	2,5
4	0,08	0,6	0,15	3,8
5	1,79	39,4	0,07	9,1
6	0,05	0,1	0,09	3,2
7	2,05	46,9	0,23	14,8

Большая часть АО высокопарафинистых нефтей (96,7...51,5 % отн.) не извлекается с помощью использованных приемов и остается в рафинатах (табл. 2). Необходимо заметить, что, в соответствии с особенностями применяемой методики, выделенные АО представлены полициклическими структурами со слаборазвитым алкильным замещением [22]. Наибольшей долей таких малоалкилированных оснований (61,7 % отн.) характеризуется малопарафинистая нефть сравнения. Следовательно, среди АО высокопарафинистых нефтей должны преобладать высокоалкилированные структуры.

Такой вывод согласуется с результатами дополнительного выделения АО методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на импрегнированном сорбенте [23] из высокопарафинистых нефтей № 1, 4 и нефти сравнения, освобожденных от К-1 и К-2. Полученные концентраты (К-3) представлены высокомолекулярными АО (ММ=736...952 а.е.м.), которые не выделяются на стадии осаждения газобразным хлористым водородом. Нефти существенно различаются по массовому выходу таких концентратов и связанному с ними  $N_{осн.}$  (табл. 3). Максимальными значениями этих параметров характеризуется высокопарафинистая высокосмолистая нефть № 4 (12,36 % мас. и 76,9 % отн.), наименьшими (0,87 % мас. и 14,8 % отн. соответственно) – высокопарафинистая малосмолистая нефть № 1. При этом следует отметить, что на ста-

дии хроматографического выделения значительная часть высокомолекулярных АО данной нефти, содержащих более 31 % отн. её  $N_{осн.}$ , элюируется с неполярными компонентами. Это может свидетельствовать о присутствии в составе высокомолекулярных АО высокопарафинистой малосмолистой нефти соединений с высокой степенью экранизации атома азота за счет развитых углеводородных фрагментов их молекул, наличие которых приближает хроматографическую подвижность АО к хроматографической подвижности углеводородов.

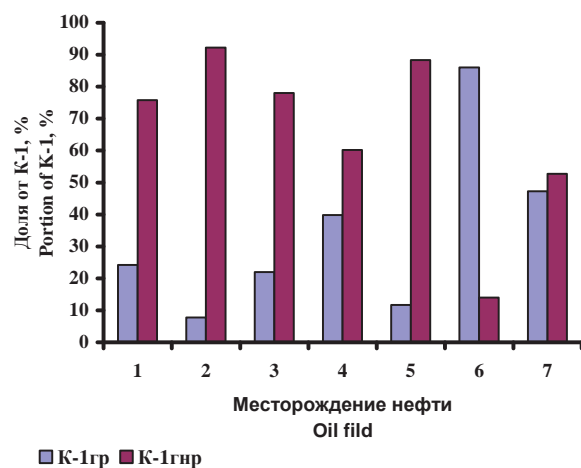
В малопарафинистой смолистой нефти № 7 содержание высокоалкилированных высокомолекулярных оснований составляет 10,06 % мас. и на них приходится 35,3 % отн.  $N_{осн.}$  нефти.

**Таблица 3.** Выделение высокомолекулярных азотистых оснований на  $SiO_2+HCl$

**Table 3.** Allocation of the high-molecular nitrogenous bases on  $SiO_2+HCl$

№ образца нефти Oil sample No.	К-3	
	Массовая доля, % Mass fraction, %	Доля $N_{осн.}$ нефти, % Fraction of $N_{bas. oil}$ , %
1	0,87	14,8
4	12,36	76,9
7	10,06	35,3

С применением метода экстракционного разделения [24] показано, что в составе К-1 всех исследованных нефтей присутствуют соединения с различными ММ. Так, растворимые в гексане основания К-1гр имеют меньшие значения ММ (561...668 а.е.м.), чем гексанонерастворимые основания К-1гнр (913...1243 а.е.м.) (рис. 1).



**Рис. 1.** Экстракционное разделение высокомолекулярных азотистых оснований. Месторождение нефти: 1 – Южно-Табганское, 2 – Фестивальное, 3 – Мамуринское, 4 – Эмлиххайм, 5 – Ландау, 6 – Ащисай, 7 – Крапивинское

**Fig. 1.** Extraction division of the high-molecular nitrogenous bases. Oil field: 1 – Southern Tabaganskoye, 2 – Festivalnoye, 3 – Mamurinskoye, 4 – Emlikhkhaym, 5 – Landau, 6 – Ashchisay, 7 – Krapivinskoye

Содержание последних в составе К-1 большинства нефтей выше (52,7 ...92,2 % отн.), чем К-1гр (7,8...47,3 % отн.). Исключение составляет высокопарафинистая высокосмолистая нефть № 6, в которой количество соединений К-1гр значительно ниже (14,0 %), чем К-1гр (86,0 %). Как отмечено выше, данная нефть также отличается от остальных преобладанием среди слабоалкилированных оснований низкомолекулярных соединений К-2. Следовательно, среди слабоалкилированных АО нефтей, как правило, преобладают соединения с высокими ММ.

Выводы о структурных различиях нефтяных высокомолекулярных оснований согласуются с данными СГА [28]. В табл. 4 приведены расчетные значения структурных параметров молекул оснований К-1гр, К-1грн и К-3 двух высокопарафинистых нефтей, различающихся смолистостью (№ 1, 4), и малопарафинистой нефти № 7.

**Таблица 4.** Структурно-групповой состав азотистых оснований высокопарафинистых и малопарафинистой нефтей

**Table 4.** Structural-group composition of the nitrogenous bases of high- and low-paraffin oils

№ образца нефти Oil sample No.	Продукт Product	Параметры/Parameters*						
		Число атомов углерода разного типа в средней молекуле Number of different carbon atoms in a middle molecule				Число колец в средней молекуле Ring number in a middle molecule		
		Ca/Ca	Cn/Cn	Cp/Cp	Cγ	Ko/Rt	Ka/Ra	Kn/Rn
1	К-1гр K-1hs	9,8	21,1	10,0	3,0	5,6	2,3	3,3
	К-1грн K-1hns	38,5	43,4	4,5	4,5	21,8	9,2	12,6
	К-3	12,9	19,6	20,5	4,7	8,1	3,3	4,8
4	К-1гр K-1hs	8,7	7,4	24,9	3,1	3,8	1,9	1,9
	К-1грн K-1hns	17,9	35,1	8,4	2,5	12,9	4,4	8,5
	К-3	11,7	18,6	18,9	4,5	7,3	2,8	4,5
7	К-1гр K-1hs	16,9	16,3	13,2	3,0	7,9	3,9	4,0
	К-1грн K-1hns	34,2	44,1	4,6	4,6	18,9	8,3	10,6
	К-3	20,1	4,9	38,4	5,2	6,1	4,8	1,3

\*Ca, Cn, Cp – число ароматических, нафтеновых, алкильных углеродных атомов в средней молекуле; Cγ – число CH<sub>3</sub> групп в средней молекуле, удаленных от ароматического ядра; Ko, Ka, Kn – число общее, ароматических, нафтеновых колец в средней молекуле.

\*Ca, Cn, Cp is the number of aromatic, naphthenic, and alkyl carbon atoms in a middle molecule; Cγ is the number of CH<sub>3</sub> groups remote from the aromatic nucleus in a middle molecule; Ro, Ra, Rn is the total number, number of aromatic and naphthenic rings in a middle molecule

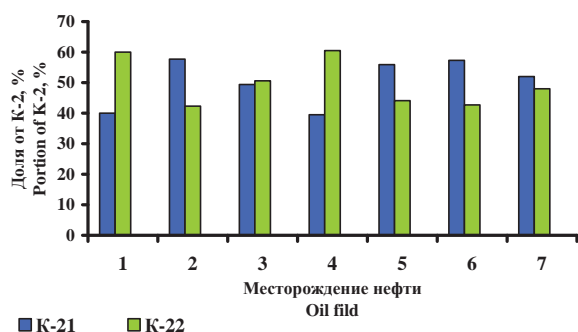
Сравнительный анализ представленных результатов показал, что средние молекулы всех образцов АО содержат алкильные (Cп), нафтеновые (Cн) и ароматические (Ca) фрагменты. Наибольшим числом циклических фрагментов (Ko=13–22)

характеризуются соединения К-1грн. Полициклическое ядро их средних молекул содержит максимальное количество ароматических (Ka=4–9) и насыщенных (Kn=8–13) колец. В то же время в алифатических структурах средних молекул этих оснований сосредоточено наименьшее число атомов углерода (Cп=4–8), которые представлены преимущественно метильными группами, на что указывает равенство общего числа алкильных атомов углерода и углеродных атомов групп CH<sub>3</sub>, удаленных от ароматических циклов (Cп/Cγ=1,0). Наибольшей средней величиной Cп (19–38) характеризуются молекулы оснований К-3. Главными алкильными заместителями в их структуре являются длинные линейные или слабоветвленные алкильные цепи (Cп/Cγ=4–7). О наличии длинных алкильных цепей в молекулах соединений К-3 свидетельствуют и данные инфракрасной спектроскопии. В ИК спектрах этих образцов присутствуют достаточно интенсивные полосы при 721...725 см<sup>-1</sup>, характерные для алкильных фрагментов с числом атомов углерода более 4 [32]. Основания К-1гр занимают промежуточное положение по общей величине алкильного обрамления (Cп=10–13). Их заместители также могут содержать более 4 углеродных атомов. По значениям параметров, характеризующих общую цикличность (Ko=4–8), число Ka (2–5) и Kn (1–5), средние молекулы оснований К-3 и К-1гр сопоставимы.

Низкомолекулярные основания К-2 всех исследуемых нефтей представляют собой сложную смесь производных пиридина, часть из которых содержит в структуре кислотные функции. Такой вывод следует из данных качественной ИК-спектроскопии. В ИК-спектрах этих образцов наблюдаются перегибы в области 1500...1580 см<sup>-1</sup>, характерные для валентных колебаний C=N связей пиридинового кольца, и полосы поглощения карбоксильных групп (3160 и 1720 см<sup>-1</sup>) [32, 33]. Использование жидкостно-адсорбционной хроматографии на импрегнированном сорбенте [23] позволило разделить концентраты на продукты К-21 и К-22, содержащие главным образом азаарены и азоткислородсодержащие соединения соответственно. Как следует из рис. 2, в составе низкомолекулярных соединений различные по структуре основания присутствуют в сопоставимых количествах. Содержание К-21 варьирует в пределах от 39,5 до 57,7 %, содержание К-22 – от 42,3 до 60,5 %.

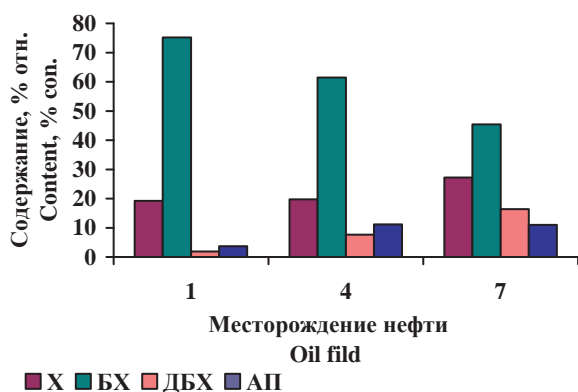
Независимо от химической природы исследуемых образцов, низкомолекулярные АО имеют сходный качественный состав. Так, методом ГХ-МС, на примере нефтей № 1, 4, 7, показано, что среди азааренов высокопарафинистых и малопарафинистых нефтей присутствуют практически одинаковые наборы алкилпроизводных хинолина (X, C<sub>n</sub>H<sub>2n-11</sub>N, C<sub>3</sub>–C<sub>10</sub>), бензохинолина (БХ, C<sub>n</sub>H<sub>2n-17</sub>N, C<sub>1</sub>–C<sub>8</sub>), дибензохинолина (ДБХ, C<sub>n</sub>H<sub>2n-23</sub>N, C<sub>1</sub>–C<sub>7</sub>) и азапирена (АП, C<sub>n</sub>H<sub>2n-21</sub>N, C<sub>1</sub>–C<sub>6</sub>) (рис. 3). Доминируют во всех случаях алкилбензохинолины (45,4...75,2 %). Сравнительно высоко относительное содержание алкилхинолинов (19,2...27,2 %).

Алкилпроизводные три- и тетрациклических структур содержатся в подчиненных количествах (1,9...16,4 % ДБХ и 3,7...11,2 % АП).



**Рис. 2.** Разделение низкомолекулярных оснований на  $\text{SiO}_2 + \text{KOH}$ . Месторождение нефти: 1 – Южно-табаганское, 2 – Фестивальное, 3 – Мамуринское, 4 – Эмлиххайм, 5 – Ландау, 6 – Ащисай, 7 – Крапивинское

**Fig. 2.** Division of the low-molecular bases in to  $\text{SiO}_2 + \text{KOH}$ . Oil field: 1 – Southern Tabaganskoe, 2 – Festivalnoe, 3 – Mamurinskoe, 4 – Emlikhkhaym, 5 – Landau, 6 – Ashchisay, 7 – Krapivinskoe



**Рис. 3.** Индивидуальный состав низкомолекулярных азотистых оснований. Месторождение нефти: 1 – Южно-Табаганское, 4 – Эмлиххайм, 7 – Крапивинское

**Fig. 3.** Individual structure of low-molecular nitrogenous bases. Oil field: 1 – Southern Tabaganskoe, 4 – Emlikhkhaym, 7 – Krapivinskoe

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Запивалов Н.П. Нефтегазовый комплекс России: состояние и перспективы на XXI век // Георесурсы. – 2002. – № 1. – С. 32–35.
2. Байдельдина О.Ж., Дарибаева Н.Г., Нуранбаева Б.М. Особенности строения и свойств парафинистых нефтей Казахстана, влияющие на эффективность мероприятий при борьбе с парафиноотложениями // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 4. – С. 100–106.
3. Халикова Д.А., Юсупова Т.Н. Оценка влияния высокомолекулярных n-алканов на физико-химические свойства парафинистых нефтей // Нефтегазовое дело. – 2009. – № 1. – С. 133–136.
4. Ганеева Ю.М. Надмолекулярная структура высокомолекулярных компонентов нефти и её влияние на свойства нефтяных систем: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Казань, 2013. – 42 с.
5. Иванова Л.В., Буров Е.А., Кошелев В.Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 1. – С. 268–284.

#### Заключение

- Проведено сравнительное изучение распределения и состава азотистых оснований в высокопарафинистых нефтях, различающихся содержанием твердых парафинов, смолисто-асфальтовых веществ и основного азота, и в малопарафинистой нефти.
  - Установлено, что в высокопарафинистых и малопарафинистых нефтях присутствуют высокомолекулярные основания со слабо- и сильноразвитым алкильным замещением и низкомолекулярные основания. Основания высокопарафинистых нефтей отличаются повышенным содержанием высокоалкилированных структур.
  - Среди слабоалкилированных АО высокопарафинистых и малопарафинистых нефтей, как правило, преобладают соединения с высокими ММ. Средние молекулы этих оснований выделяются максимальным числом ароматических (4–9) и насыщенных (8–13) циклов и минимальным алкильным замещением, представленным преимущественно 4–5 метильными заместителями.
  - В средних молекулах высокоалкилированных оснований высокопарафинистых и малопарафинистых нефтей содержится наибольшее количество алкильных атомов углерода (19–38), распределенных по линейным или слабозветвленным заместителям с длиной цепи более 4 углеродных атомов. Циклические фрагменты этих молекул включают 4–5 насыщенных и 3–5 ароматических колец.
  - Показано сходство состава низкомолекулярных азотистых оснований высокопарафинистых и малопарафинистых нефтей. Среди них идентифицированы  $\text{C}_3$ – $\text{C}_8$  хинолины,  $\text{C}_1$ – $\text{C}_6$  бензохинолины,  $\text{C}_1$ – $\text{C}_6$  дибензохинолины,  $\text{C}_1$ – $\text{C}_6$  азапирены.
- Совокупность полученных данных позволяет полагать, что для переработки исследованных высокопарафинистых и малопарафинистых нефтей могут быть использованы единые технологические схемы.

6. Герасимова Н.Н., Коваленко Е.Ю., Сагаченко Т.А. Катионоактивные ПАВ остаточных нефтей // Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 5. – С. 59–61.
7. Аюрова А.М., Герасимова Н.Н. Азотсодержащие основания и кислые соединения высокопарафинистой нефти и органического отложения // Перспективы развития фундаментальных наук: Труды XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2016. – Т. 2. – С. 41–43.
8. Герасимова Н.Н., Сагаченко Т.А. Азотсодержащие основания дизельной фракции 140–350 °С товарной смеси юрских нефтей Западной Сибири до и после гидроочистки // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 5. – С. 97–99.
9. Egorova M., Prins R. Competitive hydrodesulfurization of 4,6-dimethyldibenzothiophene, hydrodenitrogenation of 2-methylpyridine, and hydrogenation of naphthalene over sulfided Ni-Mo/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  // Journal of Catalysis. – 2004. – V. 224. – Iss. 2. – P. 278–287.



10. Laredo G.C., Altamirano E., De Los Reyes J.A. Inhibition effects of nitrogen compounds on the hydrodesulfurization of dibenzothiophene: P. 2 // *Applied Catalysis A: General*. – 2003. – V. 243. – № 2. – P. 207–214.
11. The effect of N-containing compounds on oxidative desulphurization of liquid fuel / Y. Li, G. Jia, G. Ning, C. Jin // *Catalysis Today*. – 2009. – V. 140. – № 3–4. – P. 192–196.
12. Characterization of Nitrogen Compounds in Coker Heavy Gas Oil and its Subfractions by Liquid Chromatographic Separation Followed by Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry / X. Zhu, Q. Shi, Y. Zhang, N. Pan, Ch. Xu, K.H. Chung, S. Zhao // *Energy Fuels*. – 2011. – № 25. – P. 281–287.
13. Южно-Табганское месторождение // Группа Компаний МК Логистик. URL: [http://mklogistic.ru/ujnotabaganskoe\\_mestorozhenie](http://mklogistic.ru/ujnotabaganskoe_mestorozhenie) (дата обращения: 11.10.2016).
14. Красноярова Н.А., Яценко И.Г., Серебрянникова О.В. Распределение вязких и парафинистых нефтей по площади и разрезу отложений юго-востока Западной Сибири // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 70–79.
15. Геология. Мамуринское месторождение. URL: <https://reshim24.ru/ready/attachment/download/id/208> (дата обращения 11.10.2016).
16. Нефтедобыча в Германии скромно, стабильно и очень прибыльно. Нефтяное месторождение Эмликхайм. URL: <http://www.dw.com/ru/%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%B0%D0%B2%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B8%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%8C%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B1%D1%8B%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE/a-14988903> (дата обращения 26.09.2016).
17. Тронов В.П. Промысловая подготовка нефти за рубежом. – 1983. – 224 с. Электронная библиотека. Нефть-газ. URL: <http://www.dobi.oglib.ru/bgl/7023/152.html> (дата обращения 26.09.2016).
18. Комитет недропользования республики Казахстан. Нефтяное месторождение Ащисай. URL: <http://neftegaz.ru/news/view/21414-Mestorozhdenie-nefti-Aschisay> (дата обращения 11.10.2016).
19. Нефтяники. Нефть и газ. Крапивинское месторождение. URL: <http://kniganefiti.ru/field.asp?field=38> (дата обращения: 11.10.2016).
20. Химический состав нефтей Западной Сибири / под ред. Г.Ф. Большакова. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1988. – 288 с.
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.Yu. Kovalenko, V.P. Sergun, R.S. Min // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 5–6. – P. 745–754.
22. Дифференцированное выделение азотистых соединений из нефти и продуктов её деасфальтизации / О.С. Воронова, Н.Н. Герасимова, Л.А. Цой, Т.А. Сагаченко, О.А. Бейко // *Нефтехимия*. – 1987. – Т. 27. – № 4. – С. 447–454.
23. Nitrogen-Containing Bases of Heavy Petroleum from the Van-Eeganskoe Fileds / E.Yu. Kovalenko, N.N. Gerasimova, T.A. Sagachenko, E.B. Golushkova // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. – 2001. – V. 37. – № 4. – P. 265–268.
24. Природа азотистых оснований нефтей Западной Сибири / О.С. Воронова, Г.Ф. Большаков, О.А. Бейко, Ю.П. Туров // *Нефтехимия*. – 1985. – Т. 25. – № 3. – С. 349–359.
25. Okuno I., Latham D.R., Haines W.E. Type Analysis of Nitrogen in Petroleum Using Nonaqueous Potentiometric Titration and Lithium Aluminum Hydride Reduction // *Analytical Chemistry*. – 1965. – V. 37. – № 1. – P. 54–57.
26. Современные методы исследования нефтей: справочно-методическое пособие / под ред. А.И. Богомолова, М.Б. Темьянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984. – 431 с.
27. Thermal conversion of heavy oil systems and analysis of structural changes their high components of PMR-method / G.S. Pevneva, A.K. Golovko, D.S. Korneev, A.I. Levashova // *Procedia Chemistry*. – 2014 – V. 10. – P. 15–19.
28. Golovko A.K., Kam'yanov V.F., Ogorodnikov V.D. High-molecular heteroatomic components of crude oils of the Timan-Pechora petroliferous basin // *Russian Geology and Geophysics*. – 2012. – V. 53. – Iss. 12. – P. 1374–1381.
29. Schmitter J.M., Arpino P.J. Azaarenes in Fuels // *Mass-Spectrometry Reviews*. – 1985. – № 4. – P. 87–121.
30. Bakel A.J., Philp R.P. Distribution and quantitation of organonitrogen compounds in crude oils and rock pyrolysates // *Org. Geochem*. – 1990. – V. 16. – № 1–3. – P. 353–367.
31. Yamamoto M., Taguchi K., Sasaki K. Basic nitrogen compounds in bitumen and crude oils // *Chem. Geol*. – 1991. – V. 93. – P. 193–206.
32. Солинен О.В. Применение ИК-спектроскопии в исследовании нефтей и нефтепродуктов // *Инструментальные методы исследования нефти / под ред. Иванова Г.В.* – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 18–41.
33. Jewell D.M. The role of nonhydrocarbons in the analysis virgin and biodegraded petroleum // *Petroleum in the marine environment. Adv. in Chem.* – N.Y. 1980. – Ser. 185. – P. 219–232.

Поступила 24.01.2017 г.

#### Информация об авторах

**Аюрова А.М.**, аспирант лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Герасимова Н.Н.**, кандидат химических наук, доцент, старший 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.

UDC 665.61:(547.83.+547.73)

## HIGH- AND LOW-MOLECULAR NITROGENOUS BASES IN HIGHLY PARAFFINIC OILS

Anara M. Ayurova<sup>1</sup>,

dm@ipc.tsc.ru

Natalia N. Gerasimova<sup>1</sup>,

ldm@ipc.tsc.ru

Tatyana A. Sagachenko<sup>1</sup>,

dissovet@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, 634055, Tomsk, Russia.

The relevance of the research is caused by the importance of accumulation and classification of data on content and composition of nitrogenous components in highly paraffinic oils. The data obtained could help in developing high technologies of their production, transportation, and processing.

**The main aim** of the study is to determine the characteristics of distribution and composition of high- and low-molecular nitrogenous compounds in hard wax-rich oils.

**The methods used in the study:** analyzes of elemental and functional composition, sulfuric acid extraction, liquid-adsorption chromatography over modified sorbents, infrared spectroscopy, nuclear magnetic resonance spectroscopy, and gas chromatography-mass spectrometry.

**The results.** The authors have studied the distribution and composition of high- and low molecular nitrogenous bases in high paraffinic oils with different content of paraffin wax, resin-asphaltene substances, and basic nitrogen. It was determined that there are low- and high-molecular bases with weakly and strongly developed alkyl substitution in highly paraffinic oils. The similarities and differences in composition and distribution of nitrogenous bases in oils with high and low paraffin content were revealed. The bases of highly paraffinic oils are characterized by prevalence of highly alkylated structures. It is shown that the values of structural characteristics of high- and low-molecular nitrogenous bases in oils with high and low paraffin content are similar. Middle molecules of high-molecular low-alkylated bases, enriched with aromatic (4–9) and saturated (8–13) rings, contain, preferably, 4–5 methyl substituents. The number of aromatic (3–5) and saturated (4–5) rings is lower in high-alkylated bases, which contain 19–38 alkyl carbon atoms distributed to 4–5 substituents with a chain length of more than 4 carbon atoms. Low molecular nitrogenous bases in samples of oils with high and low paraffin content are represented by C<sub>3</sub>–C<sub>8</sub> quinolines, C<sub>1</sub>–C<sub>6</sub> benzoquinolines, C<sub>1</sub>–C<sub>6</sub> dibenzoquinolines, and C<sub>1</sub>–C<sub>6</sub> azapyrenes.

**Key words:**

Highly paraffinic oil, high- and low-molecular nitrogenous bases, composition, distribution.

## REFERENCES

- Zapivalov N.P. Neftegazovyy kompleks Rossii: sostoyanie i perspektivy na XXI vek [Oil and gas complex of Russia: state and prospects for the XXI century]. *Georesursy*, 2002, no. 1, pp. 32–35.
- Baydeldina O.Zh., Daribaeva N.G., Nuranbayeva B.M. Osobennoti stroeniya i svoystv parafinistykh neftey Kazakhstana, vliyayushchiye na effektivnost meropriyaty pri borbe s parafinootlozheniyami [The features of structure and properties of paraffinic oils of Kazakhstan influencing the efficiency of actions in case of fight against deposits of paraffin]. *Sovremennyye naukoymekie tekhnologii*, 2015, no. 4, pp. 100–106.
- Khalikova D.A., Yusupova T.N. Otsenka vliyaniya vysokomolekulyarnykh n-alkanov na fiziko-khimicheskiye svoystva parafinistykh neftey [Assessment of influence of high-molecular N alkanes on physical and chemical properties paraffinic oils]. *Neftegazovoye delo*, 2009, no. 1, pp. 133–136. In Rus.
- Ganeeva Yu.M. *Nadmolekulyarnaya struktura vysokomolekulyarnykh komponentov nefti i ee vliyaniye na svoystva neftyanykh sistem*. Avtoref. Dokt. Diss. [Supramolecular structure of high-molecular components of oil and its influence on properties of oil systems. Dr. Diss. Abstract]. Kazan, 2013. 42 p.
- Ivanova L. V., Burov E.A., Koshelev V.N. Asfaltosmoloparafinovye otlozheniya v protsessakh dobychi, transporta i khraneniya [Asphaltene-resin-paraffin deposits in the processes of oil production, transportation and storage]. *Neftegazovoye delo*, 2011, no 1, pp. 268–284. In Rus.
- Gerasimova N.N., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A. Kationoaktivnyye PAV ostatochnykh neftey [Cation-active surfactant of residual oils]. *Neftyanoye khozyaystvo*, 1998, no. 5, pp. 59–61.
- Ayurova A.M., Gerasimova N.N. Azotsoderzhashchie osnovaniya i kislye soedineniya vysokoparafinistoy nefti i organicheskogo otlozheniya [Nitrogen-containing bases and sour compounds of high-paraffinic oil and organic deposit]. *Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk. Trudy XIII Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Prospects of Fundamental Sciences Development. XIII International Conference of Students and Young Scientists]. Tomsk, 2016, vol. 2, pp. 41–43.
- Gerasimova N.N., Sagachenko T.A. Azotsoderzhashchie osnovaniya dizelnoy fraktsii 140–350 °C tovarnoy smesi yurskikh neftey Zapadnoy Sibiri do i posle gidroochistki [Nitrogen-containing foundations of diesel fraction 140–350 °C of commodity mix Jurassic oils of Western Siberia before and after hydrotreating]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 5, pp. 97–99.
- Egorova M., Prins R. Competitive hydrodesulfurization of 4,6-dimethyldibenzothiophene, hydrodenitrogenation of 2-methylpyridine, and hydrogenation of naphthalene over sulfided NiMo/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Catalysis*, 2004, vol. 224, Iss. 2, pp. 278–287.
- Laredo G.C., Altamirano E., De Los Reyes J.A. Inhibition effects of nitrogen compounds on the hydrodesulfurization of dibenzothiophene: P. 2. *Applied Catalysis A: General*, 2003, vol. 243, no. 2, pp. 207–214.
- Jia Y., Li G., Ning G., Jin C. The effect of N-containing compounds on oxidative desulphurization of liquid fuel. *Catalysis Today*, 2009, vol. 140, no. 3–4, pp. 192–196.

12. Zhu X., Shi Q., Zhang Y., Pan N., Xu Ch., Chung K. H., Zhao S. Characterization of Nitrogen Compounds in Coker Heavy Gas Oil and Its Subfractions by Liquid Chromatographic Separation Followed by Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry. *Energy Fuels*, 2011, no. 25, pp. 281–287.
13. *Yuzhno-Tabaganskoye mestorozhdeniye. Gruppy Kompany MK Logistik*. Available at: [http://mklogistic.ru/ujnotabaganskoe\\_mestorojdenie](http://mklogistic.ru/ujnotabaganskoe_mestorojdenie) [Southern Tabagansky field. MK group of company Logistik]. Available at: [http://www.nftn.ru/oilfields/russian\\_oilfields/tomskaja\\_oblast/juzhno\\_tabaganskoe/9-1-0-204](http://www.nftn.ru/oilfields/russian_oilfields/tomskaja_oblast/juzhno_tabaganskoe/9-1-0-204) (accessed 11 October 2016).
14. Krasnoyarova N.A., Yashchenko I.G., Serebrennikova O.V. Area and Cross-Section Distribution of Viscous Waxy Oils in Deposits Located in the Southeast of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 70–79. In Rus.
15. *Geologiya. Mamurinskoye mestorozhdeniye* [Geology. Mamurinsky field.] Available at: <https://reshim24.ru/ready/attachment/download/id/208> (accessed 11 October 2016).
16. *Neftedobycha v Germanii skromno, stabilno i ochen pribylno. Neftyanoe mestorozhdeniye Emlikhkhaym* [Oil production in Germany is modest, steadily and very profitably. Oil field Emlikhkhaym]. Available at: <http://www.dw.com/ru/%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%B0%D0%B2%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B8-%D1%81%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%BE-%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE-%D0%B8-%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%8C-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B1%D1%8B%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE/a-14988903> (accessed 11 October 2016).
17. Thronov V.P. Promyslovaya podgotovka nefi za rubezhom [Trade preparation of oil abroad]. *Elektronnaya biblioteka. Neft-gaz*. [Electronic library. Oil-gas]. 1983, 224 p. Available at: <http://www.dobi.oglib.ru/bgl/7023/152.html> (accessed 11 October 2016).
18. *Komitet nedropolzovaniya respubliki Kazakhstan. Neftyanoye mestorozhdenie Ashchisay* [Committee of subsurface use of the Republic of Kazakhstan. Oil field Ashchisay]. Available at: <http://neftegaz.ru/news/view/21414-Mestorozhdenie-nefti-Ashchisay> (accessed 11 October 2016).
19. *Neftyaniki. Neft i gaz. Krapivinskoye mestorozhdeniye* [Oil industry workers. Oil and gas. Krapivinskoye field]. Available at: <http://kniganefiti.ru/field.asp?field=38> (accessed 11 October 2016).
20. *Khimichesky sostav neftey Zapadnoy Sibiri* [Chemical composition of Western Siberia oils]. Eds. G.F. Bolshakov. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoye otdeleniye, 1988, 288 p.
21. Sagachenko T.A., Gerasimova N.N., Kovalenko E.Yu., 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, V. 55, no. 5–6, pp. 745–754. In Rus.
22. Voronova O.S., Gerasimova N.N., Tsoy L.A., Sagachenko T.A., Beyko O.A. Differentsirovannoye vydeleniye azotistykh soyedineniy iz nefi i produktov eyo deasfaltenizatsii [The differentiated allocation of nitrogenous connections from oil and products of its deasfaltenization]. *Petroleum Chemistry*, 1987, vol. 27, no. 4, pp. 447–454. In Rus.
23. Kovalenko E.Yu., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Golushkova E.B. Azotsoderzhashchiye osnovaniya tyazhelyoy nefi mestorozhdeniya Van-Eganskoye [Nitrogen-containing bases of heavy oil of a field of Van-Eganskoye]. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2001, no. 4, pp. 33–35. In Rus.
24. Voronova, O.S., Bolshakov G.F., Beyko O.A., Turov Yu.P. Priroda azotistykh osnovany neftey Zapadnoy Sibiri [Nature of the nitrogenous bases of oils of Western Siberia]. *Petroleum Chemistry*, 1985, Vol. 25, no. 3, pp. 349–359. In Rus.
25. Okuno I., Latham D.R., Haines W.E. Type Analysis of Nitrogen in Petroleum Using Nonaqueous Potentiometric Titration and Lithium Aluminum Hydride Reduction. *Analytical Chemistry*, 1965, vol. 37, no. 1, pp. 54–57.
26. *Sovremennyye metody issledovaniya neftey* [Modern methods of investigating oils]. Eds. A.I. Bogomolov, M.B. Temyanko, L.I. Khotyntseva. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 431 p.
27. Pevneva G.S., Golovko A.K., Korneev D.S., Levashova A.I. Thermal conversion of heavy oil systems and analysis of structural changes their high components of PMR-method. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 15–19.
28. Golovko A.K., Kam'yanov V.F., Ogorodnikov V.D. High-molecular heteroatomic components of crude oils of the Timan-Pechora petroliferous basin. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, Iss. 12, pp. 1374–1381.
29. Schmitter J.M., Arpino P.J. Azaarenes in Fuels. *Mass-Spectrometry Reviews*, 1985, no. 4, pp. 87–121.
30. Bakel A.J., Philp R.P. Distribution and quantitation of organonitrogen compounds in crude oils and rock pyrolysates. *Org. Geochem.*, 1990, vol. 16, no. 1–3, pp. 353–367.
31. Yamamoto M., Taguchi K., Sasaki K. Basic nitrogen compounds in bitumen and crude oils. *Chem. Geol.*, 1991, vol. 93, pp. 193–206.
32. Solienko O.V. Primeneniye IK-spektroskopii v issledovanii neftey i nefteproduktov [Application of IR-spectroscopy in research of oils and oil products]. *Instrumentalnye metody issledovaniya nefi* [Instrumental methods of a research of oil]. Ed. by G.V. Ivanov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. pp. 18–41.
33. Jewell D.M. The role of nonhydrocarbons in the analysis virgin and biodegraded petroleum. *Petroleum in the marine environment. Adv. in Chem.*, 1980, Ser. 185, pp. 219–232.

Received: 24 January 2017.

#### Information about the authors

**Anara M. Ayurova**, postgraduate, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Natalia N. Gerasimova**, Cand. Sc., associate professor, senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Tatyana A. Sagachenko**, Dr. Sc., chief researcher, Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 631.4:550.42:546.1(571.16)

## БРОМ В ПОЧВАХ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Перминова Татьяна Анатольевна<sup>1,2</sup>,  
tatianap1991@yandex.ru/tatianap1991@utt.fr

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

Бертран Ларатт<sup>3</sup>,  
Bertrand.LARATTE@ensam.eu

Жорняк Лина Владимировна<sup>1</sup>,  
zhornyak\_lina@mail.ru

Судыко Александр Федорович<sup>1</sup>,  
afs@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Технологический университет Труа,  
Франция, 10010, г. Труа, ул. Марии Кюри, 12.

<sup>3</sup> Arts et Métiers ParisTech, I2M-IMC,  
Франция, г. Таланс, F-33400.

**Актуальность.** На сегодняшний день бром остается одним из наименее изученных элементов, с чем, несомненно, связано отсутствие каких-либо его нормативов в некоторых объектах окружающей среды (почвы, продукты питания). Обладая высокой химической активностью и миграционной способностью, элемент способен легко проникать в живые организмы по трофическим цепям. Высокая токсичность брома, отрицательное его воздействие на физиологические функции живых организмов диктуют необходимость тщательного исследования элемента в окружающей среде. Ввиду того факта, что почва является первичным «производителем» питательных веществ для растений, а следовательно, и для других высших живых организмов (включая человека), необходимость исследования ее химического состава является первостепенной задачей, важность которой не вызывает сомнений.

**Цель работы:** изучение содержания и закономерностей распределения брома в почвах Томской области.

**Методы исследований:** основной метод исследования – инструментальный нейтронно-активационный анализ.

**Результаты.** Представлены результаты исследований химических элементов в почвах населенных пунктов 14 районов Томской области. Выявлены повышенные концентрации брома в почвах отдельных территорий. Проведен сравнительный анализ уровней накопления брома в почвах Томской области с почвами других регионов Российской Федерации и зарубежья, установлены корреляционные взаимосвязи с другими химическими элементами, а также рассмотрены возможные природные и антропогенные факторы, влияющие на накопление данного элемента.

**Выводы.** В ходе исследования была установлена степень загрязнения почв Томской области и отдельных ее районов согласно расчетам суммарного показателя загрязнения. Выяснено, что бром является единственным элементом, значения коэффициентов концентрации которого превышают 10 единиц для почв практически всех районов области, относительно выбранного условного фона. Выявлено также, что содержания брома в почвах Томской области выше концентраций, установленных для почв мира, кларковых содержаний элемента, а также уровней накопления, обнаруженных в почвах других регионов России. Максимальные содержания брома были обнаружены в почвах Бакчарского района области.

### Ключевые слова:

Химические элементы, бром, геохимические ассоциации, почвы, Томская область.

### Введение

Исследования, посвященные изучению содержания химических элементов в почвах Сибири, получили весьма широкое развитие еще в 60-х гг. прошлого столетия [1, 2]. Сотрудниками лабораторий агрохимии и биогеохимии почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН получены многочисленные данные о закономерностях поведения большого числа элементов в почвах и почвообразующих породах Западной Сибири [3–5 и др.]. Особенности накопления и перераспределения комплекса химических элементов и их соединений

в почвах Томской области показаны в работах ряда ученых, отмечающих специфику их концентрирования в зависимости от типов почв, ландшафтно-геохимических характеристик, а также сложившейся на территории эколого-геохимической ситуации [6–10 и др.]. Тем не менее, несмотря на значительное количество накопившейся информации, некоторые элементы до сих пор остаются малоизученными.

К одним из таких элементов относится бром. Сведения о его геохимических особенностях, в том числе поведение в ассоциациях с другими химиче-

скими элементами на территории Томской области остаются весьма ограниченными. Обладая высокой химической активностью и миграционной способностью, элемент способен легко проникать в живые организмы по трофическим цепям [11] и накапливаться в повышенных концентрациях в различных органах и тканях человека [12]. Несмотря на эссенциальность брома [13], по мнению некоторых авторов, он относится к элементам, чаще других приводящих к риску для здоровья человека, участвуя в формировании и развитии некоторых заболеваний [14–16]. Отрицательное воздействие брома на физиологические функции живых организмов наряду с высокой токсичностью элемента диктуют необходимость тщательного исследования элемента в окружающей среде.

Следует отметить, что, на основе представленных в данной работе результатов, в настоящий момент авторами проводятся детальные исследования по изучению токсичности брома в почвах Томской области и его влияния на экосистемы и здоровье человека посредством современных методов и методик оценки воздействия на почвы [17], а также экологического моделирования.

#### Методика исследования

Отбор проб почв на территории Томской области проводился в 2004–2015 гг. Пробы были отобраны в 75 населенных пунктах 14-ти муниципальных районов области (Александровский и Каргасокский районы не включены в данное исследование). Общее количество проб составляет 384.

Отбор почвенных образцов проводился в последней декаде апреля – первой декаде мая методом «конверта»: из пяти точек (по углам и в центре прямоугольника приусадебных хозяйств населенных пунктов районов области), глубина которых составляла около 10 см – верхний плодородный слой. При отборе проб фиксировалось наличие/отсутствие использования органических удобрений. В пределах Томского района области пробы почв отбирались также в зонах расположения разнопрофильных промышленных предприятий. Точечные пробы, отобранные на одной пробной площадке, объединялись, чем достигалось их смешение. Пробоподготовка осуществлялась в соответствии с методическими рекомендациями [18] на кафедре геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета.

Подготовленные пробы отправлялись на высокочувствительный инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), реализованный на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в аккредитованной лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета. Анализ осуществлялся аналитиками с. н. с. А.Ф. Судыко и Л.Ф. Богутской. Измерения проводились на гамма-спектрометре с германий-литиевым детектором. Достоверность анализа подтверждена контрольными определениями, выпол-

нялся внутренний контроль. Статистическая обработка проводилась с использованием программы Statistica 8.0. Расчеты показателей: коэффициента концентрации и суммарного показателя загрязнения почв, проводились согласно методическим рекомендациям [19].

#### Результаты и обсуждение

На основании полученных аналитических данных по содержанию химических элементов в почвах населенных пунктов Томской области (384 пробы) нами были рассчитаны коэффициенты концентрации каждого отдельного элемента, а также суммарный показатель загрязнения (СПЗ) почв по районам области с учетом 25 других изученных химических элементов. Коэффициенты концентрации рассчитывались относительно фоновых значений по заказнику «Томский» [20].

Как видно из табл. 1, почвы разных районов Томской области отличаются специфическими геохимическими ассоциациями элементов. Проведенные учеными-геологами, экологами и геохимиками работы показали, что территория Томской области характеризуется значительной геохимической неоднородностью, обусловленной как природными, так и техногенными факторами. Так, по гидрогеохимическим данным, в Обь-Енисейском междуречье выделяется региональная субмиридональная зона, являющаяся переходной по химическому составу между меловыми захороненными минерализованными морскими хлоридными водами левобережья р. Обь и гидрокарбонатными инфильтрационными водами правобережной части, простирающейся вплоть до р. Енисей [21]. Ширина этой зоны, с осью в районе г. Колпашево, достигает 150–200 км. Она контролирует юго-восточную границу Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, пространственно совпадающей с полосой развития фаций внутреннего шельфа и прибрежно-морских равнин. К ней же приурочены контуры территории распространения железоносных отложений известного уникального по масштабам Западно-Сибирского железорудного бассейна [22, 23]. Сложившаяся геохимическая ситуация предполагает возможность выявления в пределах Чулымо-Енисейской впадины месторождений ураново-полиэлементного состава [22]. Кроме указанного выше крупнейшего месторождения железных руд и перспектив наличия других полезных ископаемых, на территории Томской области разведаны месторождения циркон-ильменитовых песков, а также месторождения углей и торфов [24]. Весь этот природный комплекс оказывает несомненное влияние на геохимическую специализацию почв, а присутствие ряда мелких и крупных разнопрофильных предприятий [6, 7, 9, 10, 12, 20 и др.] завершает полифакторный характер их элементного состава.

Рассчитанный нами суммарный показатель загрязнения почв изменяется от 33 до 76 единиц в разных районах области, что, согласно ориентиро-

**Таблица 1.** Значения коэффициентов концентраций химических элементов и суммарный показатель загрязнения почв населенных пунктов районов Томской области

**Table 1.** Values of concentration coefficients of chemical elements and the total soil pollution index (TPI) in the settlements of the districts of Tomsk region

Район/District	Коэффициент концентрации/Concentration coefficient			СПЗ TPI	Вклад Br (%) в СПЗ Br (%) to TPI
	1–5	5–10	>10		
Парабельский Parabelsky	(Ba,Tb) <sub>4,8</sub> , Ta <sub>4,4</sub> , Ca <sub>4,3</sub> , U <sub>3,8</sub> , Au <sub>3,3</sub> , Rb <sub>2,9</sub> , Sb <sub>2,6</sub> , Cs <sub>2,3</sub> , (Yb,Hf) <sub>2,1</sub> , Na <sub>1,9</sub> , (Cr,Lu) <sub>1,8</sub> , Co <sub>1,7</sub> , (Fe,Th) <sub>1,5</sub> , Ce <sub>1,3</sub> , (La,Sr,Sm) <sub>1,2</sub>	Ag <sub>8,0</sub>	Br <sub>12,3</sub>	51	24,2
Колпашевский Kolpashevsky	Tb <sub>4,4</sub> , Sb <sub>4,2</sub> , Ta <sub>4,1</sub> , Ca <sub>4,0</sub> , U <sub>3,9</sub> , Rb <sub>3,2</sub> , Na <sub>2,7</sub> , Hf <sub>2,6</sub> , Cr <sub>2,4</sub> , (Lu,Au) <sub>2,3</sub> , Yb <sub>2,1</sub> , Cs <sub>1,7</sub> , (Fe,Co,Sr) <sub>1,6</sub> , Th <sub>1,5</sub> , (Ce,Sm) <sub>1,4</sub> , La <sub>1,2</sub>	Br <sub>9,9</sub> , Ag <sub>8,0</sub> , Ba <sub>5,8</sub>	–	52	19,1
Чаинский Chainsky	Ba <sub>4,9</sub> , Sb <sub>4,4</sub> , Ag <sub>4,0</sub> , Lu <sub>3,8</sub> , Yb <sub>3,7</sub> , Cs <sub>2,9</sub> , Co <sub>2,4</sub> , (Na,Fe) <sub>2,3</sub> , (Cr,Th) <sub>1,9</sub> , (Hf,La) <sub>1,7</sub> , Sm <sub>1,6</sub> , Ce <sub>1,5</sub> , Sc <sub>1,3</sub> , Sr <sub>1,1</sub>	Ta <sub>8,3</sub> , Rb <sub>8,0</sub> , Ca <sub>7,9</sub> , Tb <sub>7,2</sub> , U <sub>6,9</sub> , Au <sub>5,9</sub>	Br <sub>12,7</sub>	77	16,5
Молчановский Molchanovsky	Sb <sub>4,5</sub> , Ag <sub>4,0</sub> , Rb <sub>3,4</sub> , (Cr,Yb) <sub>3,2</sub> , Ca <sub>3,0</sub> , Cs <sub>2,8</sub> , Lu <sub>2,6</sub> , Na <sub>2,4</sub> , (Fe,Co) <sub>2,2</sub> , Th <sub>1,8</sub> , (Ce,Sm) <sub>1,7</sub> , (La,Hf) <sub>1,6</sub> , (Sr,Au) <sub>1,4</sub> , Sc <sub>1,2</sub>	Tb <sub>8,9</sub> , Ta <sub>8,9</sub> , U <sub>6,2</sub> , Ba <sub>5,4</sub>	Br <sub>12,1</sub>	64	18,8
Кривошеинский Krivosheinsky	(Rb,Ag) <sub>4,0</sub> , Cr <sub>3,6</sub> , U <sub>3,5</sub> , Yb <sub>3,1</sub> , Au <sub>3,0</sub> , Sb <sub>2,6</sub> , Ca <sub>2,3</sub> , Cs <sub>2,2</sub> , (Na,Lu) <sub>2,1</sub> , (Fe,Co) <sub>1,9</sub> , Sm <sub>1,8</sub> , (Ce,Th) <sub>1,6</sub> , Hf <sub>1,5</sub> , La <sub>1,3</sub> , Sc <sub>1,1</sub>	Ta <sub>7,7</sub> , Tb <sub>6,5</sub> , Ba <sub>5,8</sub>	Br <sub>14,0</sub>	57	24,5
Шегарский Shegarsky	Sb <sub>4,5</sub> , Ag <sub>4,0</sub> , Cs <sub>3,9</sub> , Rb <sub>3,2</sub> , Ca <sub>3,0</sub> , Yb <sub>2,9</sub> , Cr <sub>2,7</sub> , Na <sub>2,4</sub> , Lu <sub>2,3</sub> , Fe <sub>2,2</sub> , Co <sub>2,0</sub> , Au <sub>1,9</sub> , Th <sub>1,7</sub> , Ce <sub>1,6</sub> , (La, Hf) <sub>1,5</sub> , Sm <sub>1,4</sub> , Sc <sub>1,2</sub>	Ta <sub>7,7</sub> , Tb <sub>7,5</sub> , U <sub>6,3</sub> , Ba <sub>5,5</sub>	Br <sub>11,9</sub>	61	19,6
Кожевниковский Kozhevnikovsky	Rb <sub>4,8</sub> , Ca <sub>3,6</sub> , Cs <sub>3,4</sub> , Yb <sub>3,3</sub> , Sb <sub>3,0</sub> , Cr <sub>2,6</sub> , Lu <sub>2,5</sub> , (Fe,Ba) <sub>2,4</sub> , U <sub>2,3</sub> , (Na, Co) <sub>2,2</sub> , Th <sub>2,1</sub> , (As, Ce) <sub>1,8</sub> , (La,Hf) <sub>1,6</sub> , Sc <sub>1,5</sub> , Ag <sub>1,4</sub> , Sm <sub>1,3</sub>	Tb <sub>5,5</sub> , Ta <sub>5,3</sub>	Br <sub>15,1</sub>	52	29,2
Томский Tomsky	U <sub>4,9</sub> , (Au,Rb) <sub>4,7</sub> , Ba <sub>4,4</sub> , Ca <sub>3,7</sub> , Yb <sub>3,0</sub> , Cs <sub>2,9</sub> , Cr <sub>2,6</sub> , (Na,Lu) <sub>2,5</sub> , Fe <sub>2,4</sub> , Co <sub>2,2</sub> , Th <sub>2,0</sub> , Hf <sub>1,8</sub> , Ce <sub>1,7</sub> , (Sm, La) <sub>1,5</sub> , Sc <sub>1,4</sub>	Br <sub>7,8</sub> , Tb <sub>7,7</sub> , Sb <sub>7,1</sub> , Ag <sub>5,6</sub> , Ta <sub>5,2</sub>	–	62	12,6
Асиновский Asinovsky	Lu <sub>4,5</sub> , Yb <sub>3,6</sub> , Ba <sub>3,3</sub> , Cs <sub>2,9</sub> , Na <sub>2,8</sub> , (Fe,Co) <sub>2,1</sub> , Ag <sub>2,0</sub> , Th <sub>1,7</sub> , (Cr,La,Sm,Hf) <sub>1,5</sub> , (Sc,As,Ce) <sub>1,3</sub> , Sr <sub>1,1</sub>	Ca <sub>8,2</sub> , Rb <sub>7,9</sub> , Ta <sub>7,6</sub> , U <sub>6,6</sub> , Au <sub>6,5</sub> , Tb <sub>5,6</sub> , Sb <sub>5,4</sub>	Br <sub>16,4</sub>	76	21,5
Первомайский Pervomaysky	Lu <sub>4,0</sub> , Yb <sub>3,4</sub> , Na <sub>2,6</sub> , Sr <sub>2,5</sub> , As <sub>2,2</sub> , (Fe,Co) <sub>1,5</sub> , (La,Hf) <sub>1,4</sub> , (Cs,Sm) <sub>1,2</sub> , Th <sub>1,1</sub>	Ca <sub>9,7</sub> , Au <sub>8,0</sub> , Rb <sub>7,4</sub> , Ta <sub>6,6</sub> , Tb <sub>6,5</sub> , Sb <sub>6,3</sub> , U <sub>5,6</sub> , Ba <sub>5,2</sub>	Br <sub>13,0</sub>	72	18,0
Верхнекетский Verkhneketsky	Ba <sub>3,9</sub> , Cr <sub>3,5</sub> , Ta <sub>3,3</sub> , Tb <sub>3,0</sub> , Rb <sub>2,8</sub> , U <sub>2,5</sub> , (Na,Ca) <sub>2,0</sub> , Sb <sub>1,9</sub> , Au <sub>1,8</sub> , (Sr,Yb) <sub>1,5</sub> , (Cs,Lu,Hf) <sub>1,3</sub>	Ag <sub>5,3</sub>	Br <sub>11,3</sub>	34	33,0
Тегульдетский Teguldetsky	(Sb,Tb) <sub>4,7</sub> , U <sub>4,6</sub> , As <sub>3,8</sub> , Ba <sub>3,7</sub> , Rb <sub>3,2</sub> , (Cs,Yb) <sub>2,6</sub> , (Ag,Lu) <sub>2,0</sub> , Co <sub>1,9</sub> , (Na,Fe) <sub>1,6</sub> , Sr <sub>1,5</sub> , (Hf, Th) <sub>1,3</sub> , (La, Ce, Sm) <sub>1,2</sub>	Au <sub>8,1</sub> , Ca <sub>7,6</sub> , Ta <sub>5,8</sub> , Cr <sub>5,2</sub>	Br <sub>11,0</sub>	61	18,0
Зырянский Zyryansky	Tb <sub>4,4</sub> , Ca <sub>4,2</sub> , Ba <sub>4,0</sub> , (Rb,U) <sub>3,7</sub> , Sb <sub>3,6</sub> , Ta <sub>3,1</sub> , Cr <sub>3,0</sub> , Ag <sub>2,8</sub> , (Yb,Lu) <sub>2,1</sub> , Cs <sub>1,9</sub> , Fe <sub>1,6</sub> , (Na,Co) <sub>1,4</sub> , Th <sub>1,3</sub> , (La,Ce) <sub>1,2</sub> , Hf <sub>1,1</sub>	Br <sub>9,0</sub> , Au <sub>5,6</sub>	–	43	21,2
Бакчарский Bakcharsky	Rb <sub>4,6</sub> , U <sub>4,5</sub> , Ag <sub>4,0</sub> , (Sb,Cs) <sub>3,4</sub> , (Ca,Ba) <sub>3,1</sub> , (Co,Yb) <sub>2,5</sub> , Au <sub>2,4</sub> , Lu <sub>2,3</sub> , Cr <sub>2,2</sub> , Th <sub>2,1</sub> , Fe <sub>2,0</sub> , Ce <sub>1,7</sub> , Na <sub>1,6</sub> , La <sub>1,5</sub> , (Sm,Hf) <sub>1,4</sub> , Sc <sub>1,3</sub> , Sr <sub>1,1</sub>	Ta <sub>7,3</sub> , Tb <sub>6,0</sub>	Br <sub>32,9</sub>	75	43,6

Примечание: степени загрязнения согласно Ю.Е. Сае и др. [19]: СПЗ от 0 до 16 – низкая; 16–32 – средняя; 32–128 – высокая; более 128 – очень высокая; СПЗ рассчитывался для элементов, коэффициент концентрации которых превышал 1.

Note: levels of contamination according to Yu.E. Saet et al. [19]: TPI from 0 to 16 – low; 16–32 – average; 32–128 – high; more than 128 – very high; TPI was calculated for the elements, the concentration coefficients of which exceeded 1.

вочной шкале оценки аэрогенных очагов загрязнения [19], характеризует данные почвы как высоко загрязненные. При этом можно отдельно выделить почвы Верхнекетского района, которые очень близки к среднему уровню загрязнения. Среди представленных в табл. 1 элементов особое внимание привлекает бром. Он является единственным элементом, значения коэффициентов концентрации которого превышают 10 единиц для почв практически всех районов области относительно условного фона. Именно данный факт способствовал более детальному рассмотрению геохимических особенностей данного элемента в изучаемых почвах.

Нами был рассчитан вклад брома в суммарный показатель загрязнения почв в каждом изученном районе области (табл. 1). В целом можно отметить, что вклад брома в общий СПЗ значительно варьи-

рует, при этом средний вклад составляет 22,8 %, при минимальном 12,6 %, зафиксированном в почвах Томского района, и максимальном – 43,6 % – в почвах Бакчарского района.

Статистические параметры демонстрируют, что распределение брома в почвах имеет тенденцию к относительной неоднородности при анализе всей территории Томской области и характеризуется локальными участками с несколько более высокими значениями средних содержаний, что формирует вариативность более 70 % (табл. 2) и требует более тщательных исследований. Мы не берем судить о параметрах по изученному элементу для Парабельского, Колпашевского, Молчановского, Кривошеинского, Шегарского и Первомайского районов, где количество проб незначительное для каких-либо выводов, лишь приводим данные как предварительную информацию.

**Таблица 2.** Статистические показатели содержания брома (мг/кг) в почвах районов Томской области (N=384)

**Table 2.** Statistical parameters of bromine content (mg/kg) in soils of the districts of Tomsk region (N=384)

Район/District	N	$\bar{X} \pm \lambda$	Min–Max	V, %	Mo	Me
Парабельский Parabelsky	6	14,8±1,7	9,0–22,1	29	–	14,5
Колпашевский Kolpashevsky	6	11,9±2,1	7,5–21,3	43	–	10,4
Чаинский Chainsky	16	15,3±2,0	5,0–31,8	54	5,0	13,1
Молчановский Molchanovsky	5	14,5±1,1	11,1–18,0	17	–	14,4
Кривошеинский Krivoshainsky	2	16,8±3,8	13,0–20,1	32	–	16,8
Шегарский Shegarsky	2	14,3±1,3	13,0–15,6	13	–	14,3
Кожевниковский Kozhevnikovsky	33	18,1±1,5	0,5–35,8	47	–	18,8
Томский Tomsky	177	9,3±0,4	0,5–59,5	63	0,5	9,1
Асиновский Asinovsky	15	19,7±1,8	5,0–31,8	35	23,4	20,8
Первомайский Pervomaysky	5	15,6±3,2	5,0–23,9	46	14,4	14,4
Верхнекетский Verkhneketsky	14	13,6±2,2	4,4–30,1	60	–	10,7
Тегульдетский Teguldetsky	20	13,2±1,4	5,0–28,0	48	5,0	12,4
Зырянский Zyryansky	44	10,8±1,0	3,9–34,4	62	6,1	8,6
Бакчарский Bakcharsky	39	39,4±1,9	12,1–64,9	30	–	41,1
Томская область Tomsk region	384	14,6±0,6	0,5–64,9	78	0,5	11,2

Примечание: N – количество проб;  $\bar{X}$  – среднее значение (без учета «ураганных» проб);  $\lambda$  – стандартная ошибка; Min и Max – минимальное и максимальное значения соответственно; V – коэффициент вариации; Mo – мода; Me – медиана.

Note: N is the number of samples;  $\bar{X}$  is the average value (excluding «hurricane» samples);  $\lambda$  is the standard error; Min and Max are the minimum and maximum values, respectively; V is the variation coefficient; Mo is the mode; Me is the median.

Для территорий с достаточной выборкой обращает внимание наибольшая вариабельность брома в почвах Томского, Зырянского и Верхнекетского районов, которая, однако, не является критичной. Тем не менее, данный разброс может свидетельствовать о наличии дополнительных источников поступления элемента, носящего не только природный характер. Так, согласно исследованиям Л.В. Жорняк [10], в почвах Томского района фиксируются локальные геохимические аномалии по бромю, приуроченные к деятельности таких предприятий, как ОАО «Фармстандарт-Томскхимфарм», ЗАО «Томский приборный завод», а также ОАО «Томский электроламповый завод». Стоит отметить, что на сегодняшний день первый из них не функционирует, но факт использования брома в фармацевтической/химической промышленности широко известен. По-видимому, соединения брома

также используется на определённых производственных этапах двух других заводов. Кроме того, исследованиями сотрудников кафедры ГЭГХ ТПУ было неоднократно показано, что бром может поступать в окружающую среду в результате деятельности Томского нефтехимического комбината (ныне Сибур) и Сибирского химического комбината, расположенных также в пределах данного района. Кроме того, именно в Томском районе области было зафиксировано формирование бромной биогеохимической субпровинции, сформированной в результате комплексного воздействия разнопрофильных предприятий [25].

Зырянский район, с одной стороны, может испытывать на себе влияние близлежащего Томского района с его комплексным техногенным воздействием. С другой же стороны, он характеризуется наличием природных проявлений, которые могут быть богаты бромом. Так, почвы населенного пункта Семеновка, расположенного в пределах распространения Яйского бурогоугольного месторождения, характеризуются несколько более высокими содержаниями данного элемента (18,6 мг/кг) по сравнению с другими изученными поселками, содержание в которых ниже и составляет, например, для почв Иловки – 7,5 мг/кг.

Территория Верхнекетского района характеризуется выходом на поверхность локальных территорий минеральных вод. Так, для населенного пункта Белый яр, относящегося к данному району и имеющему локальный источник минеральных вод, значение брома в почвах составляет 17 мг/кг в отличие от других поселков, среднее содержание в почвах которых не превышает 7,4 мг/кг. Стоит обратить отдельное внимание на наличие наибольшего количества геохимических ассоциаций брома на территории данного района, что требует более детальных исследований (табл. 3).

Результаты расчета коэффициентов парной корреляции, представленные в табл. 3, позволяют установить корреляционные связи брома с другими химическими элементами в почвах районов Томской области. Следует отметить, что рассматривались только те районы области, в которых было отобрано минимум 10 проб.

В почвах населенных пунктов районов Томской области отмечаются различные геохимические связи брома. Это может быть обусловлено многочисленными факторами. Во-первых, каждый район области характеризуется неидентичными природными и техногенными условиями. Во-вторых, почвы в пределах Томской области значительно различаются по своему составу, физико-химическим свойствам, водному режиму, содержанию гумуса и другим факторам [8]. Все это в той или иной степени может влиять как на формы нахождения брома, так и на его миграционную и реакционную способности и, как следствие, на механизмы взаимодействия с химическими элементами и формирования различных соединений. Некоторые связи брома, тем не менее, являются идентичными для гранича-

**Таблица 3.** Коэффициенты парной корреляции брома с химическими элементами в почвах районов Томской области

**Table 3.** Coefficients of bromine pair correlation with chemical elements in soils of the districts of Tomsk region

Район/District	Na	Ca	Sc	Cr	Fe	Co	As	Rb	Sr	Ag	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Ta	Au	Th	U
Чаинский Chainsky	0,22	0,55	<b>0,92</b>	0,58	<b>0,20</b>	<b>0,13</b>	<b>0,08</b>	<b>0,87</b>	–	–	0,29	0,52	0,28	<b>0,35</b>	<b>0,13</b>	0,34	0,51	<b>0,72</b>	0,22	<b>0,65</b>	<b>0,22</b>	0,13	<b>0,85</b>	<b>0,41</b>	<b>0,64</b>
Кожевниковский Kozhevnikovsky	<b>0,27</b>	<b>0,03</b>	<b>0,24</b>	<b>0,29</b>	<b>0,19</b>	<b>0,13</b>	<b>0,22</b>	<b>0,03</b>	<b>0,37</b>	0,27	0,19	0,11	<b>0,36</b>	<b>0,30</b>	<b>0,36</b>	0,03	<b>0,24</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>	<b>0,22</b>	<b>0,42</b>	0,14	0,23	<b>0,18</b>	<b>0,36</b>
Томский Tomsky	0,18	0,40	0,40	0,29	0,42	0,32	0,26	0,37	0,13	<b>0,02</b>	0,07	0,14	0,05	0,50	0,29	<b>0,55</b>	0,34	<b>0,53</b>	0,34	0,46	0,20	0,09	0,40	0,37	<b>0,31</b>
Асиновский Asinovsky	<b>0,34</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>	<b>0,10</b>	<b>0,75</b>	<b>0,54</b>	–	<b>0,61</b>	–	–	<b>0,56</b>	<b>0,26</b>	<b>0,19</b>	<b>0,65</b>	<b>0,65</b>	0,06	<b>0,23</b>	<b>0,25</b>	<b>0,55</b>	<b>0,66</b>	<b>0,61</b>	<b>0,73</b>	0,08	0,08	<b>0,60</b>
Верхнекетский Verkhneketsky	<b>0,78</b>	<b>0,75</b>	<b>0,85</b>	0,21	<b>0,80</b>	<b>0,80</b>	<b>0,12</b>	<b>0,02</b>	0,15	0,16	0,03	<b>0,64</b>	0,51	<b>0,86</b>	<b>0,87</b>	<b>0,70</b>	<b>0,54</b>	<b>0,79</b>	<b>0,84</b>	<b>0,91</b>	<b>0,68</b>	<b>0,69</b>	0,08	<b>0,78</b>	<b>0,80</b>
Тегульдетский Teguldetsky	0,19	0,42	0,01	<b>0,54</b>	0,12	0,43	–	0,19	0,18	–	0,08	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,48</b>	0,14	0,43	<b>0,50</b>	0,40	<b>0,51</b>	0,43	0,04	<b>0,01</b>	0,04	0,14	0,12
Зырянский Zyryansky	0,11	<b>0,53</b>	0,19	<b>0,36</b>	0,17	0,16	–	0,16	0,22	0,04	0,24	0,15	0,02	0,14	0,05	0,24	0,14	0,13	0,24	0,15	0,02	0,11	<b>0,05</b>	0,17	0,14
Бакчарский Bakcharsky	<b>0,37</b>	<b>0,51</b>	<b>0,37</b>	<b>0,33</b>	<b>0,34</b>	0,21	<b>0,23</b>	0,29	0,28	–	0,26	0,21	<b>0,40</b>	<b>0,49</b>	<b>0,33</b>	<b>0,40</b>	0,23	<b>0,41</b>	<b>0,55</b>	<b>0,39</b>	0,27	0,03	0,06	<b>0,43</b>	<b>0,46</b>

Примечание: уровень вероятности – 95 %; отрицательные корреляционные связи выделены красным цветом; **значимые положительные связи показаны жирным шрифтом.**

Note: probability level is 95 %; negative correlations are highlighted in red; **significant relationships are shown in bold.**

ских районов области. Например, значимая отрицательная связь брома с хромом отмечается для почв Тегульдетского и Зырянского районов; положительные связи характерны для брома с лантаном, европием и иттербием в почвах Тегульдетского и Верхнекетского районов. Большое количество значимых корреляционных связей характерно также для брома в почвах Бакчарского района. Именно в данных почвах отмечаются наибольшие содержания галогена (рис. 1), причем высокие концентрации элемента (выше среднеобластных) характерны для почв всех без исключения изучаемых населенных пунктов данного района (*указаны средние значения в мг/кг*: Бакчар – 42,9; Вавилонка – 45,5; Кенга – 25,4; Крыловка – 45,0; Богатыревка – 52,4; Польшанка – 39,1; Высокий Яр – 33,4; Новая Бурка – 35; Поротниково – 31,6; Парбиг – 46,5; Плотниково – 35,5; Подольск – 35,2; Панычево – 63,7; Чернышевка – 43,5; Чумакаевка – 38,8; Большая Галка – 47,5; Хуторское – 39,9; Кедровка – 45,3). Помимо этого, изучение нескольких болот Томской области показало, что болото Бакчарское, расположенное в Бакчарском районе области, характеризуется также самыми высокими содержаниями брома относительно изучаемых торфов области – 35,4 мг/кг сухого вещества [26]. Возможно, в данном районе существуют специфические геохимические условия или факторы, способствующие аккумуляции элемента.

Кроме того, отличительной особенностью почв Бакчарского и Верхнекетского районов является наличие геохимических ассоциаций брома с натрием, железом, кальцием и барием. Отмечается, что образование комплексных соединений с галоидами характерно для железа. Иллювиальные, обогащенные оксидами и гидроксидами железа почвы обладают значительной бромфиксирующей способностью [5], что может объяснять геохимические ассоциации брома с железом. Геохимические

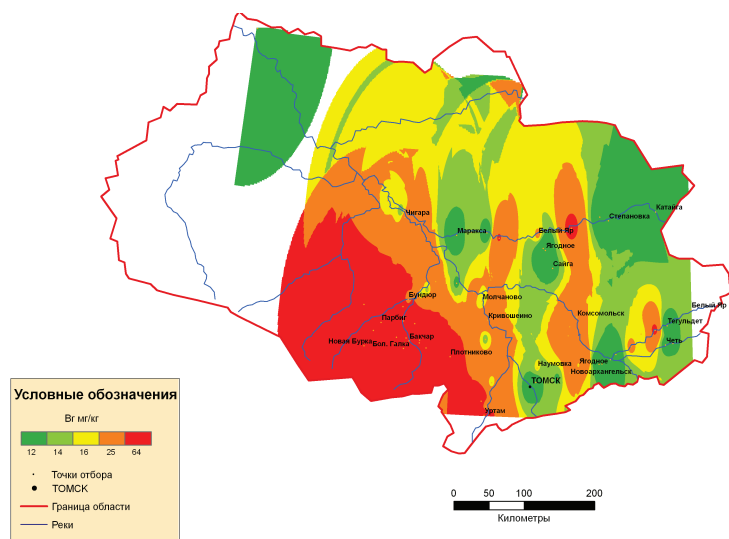
связи брома с барием и кальцием в почвах Бакчарского района, где отмечаются наибольшие концентрации элемента, возможно, указывают на связь брома с карбонатами, которые создают естественный геохимический барьер на пути миграции элемента и способствуют его аккумуляции. Эта информация находит подтверждение в работах Г.А. Конарбаевой [5], причем автором детализируется, за счет каких процессов это может происходить: сорбция, окклюзия и реакция обмена. Можно также рассмотреть гипотезу о флюидном влиянии миграционных потоков [27], которые могут приводить к повышенным концентрациям брома в почвах Бакчарского района.

Помимо описанных выше природных факторов, которые в той или иной степени способны влиять на аккумуляцию элемента в почвах, нельзя исключать и антропогенный характер его поступления. Отмечается, что на юге Сибири, в том числе в Томской области, часто фиксируется загрязнение компонентов окружающей среды продуктами ракетного топлива. Бром, а именно пентафторид брома, часто используется как окислитель ракетного топлива [28], с чем могут быть связаны повышенные уровни накопления элемента в Бакчарском, а также частично в Кожевниковском районах области.

Согласно результатам кластерного анализа, в почвах Томской области выделяется значимая ассоциация брома с танталом, которая вызывает вопросы и требует дальнейших исследований (рис. 2). Следует отметить, что данная ассоциация тяготеет к группе тесно взаимосвязанных элементов, включающих Rb и Cs, Co и Fe, а также Th, Ce, Sc.

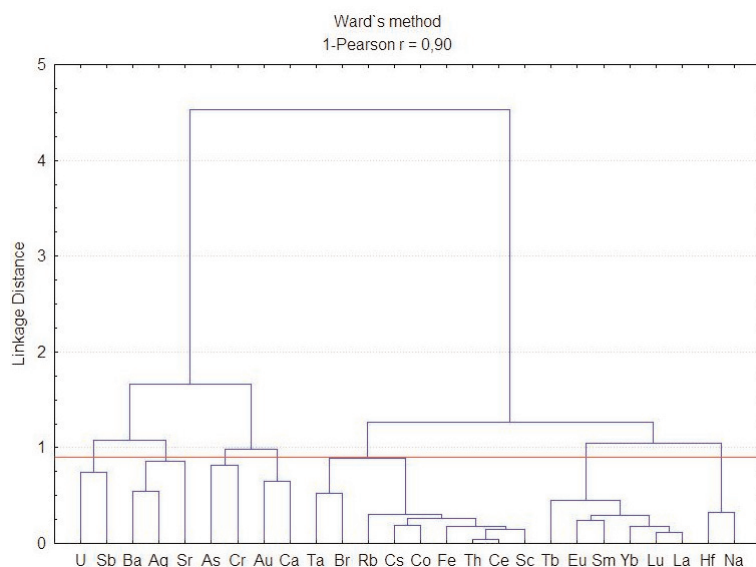
Интерпретация результатов по содержанию брома в почвах во многом затруднена отсутствием каких-либо нормативов для данного элемента в изучаемом объекте природной среды. Для оценки уровней концентрирования брома в почвах нами предла-





**Рис. 1.** Карта-схема распределения брома (мг/кг) в почвах Томской области

**Fig. 1.** Schematic map of bromine distribution (mg/kg) in soils of Tomsk region



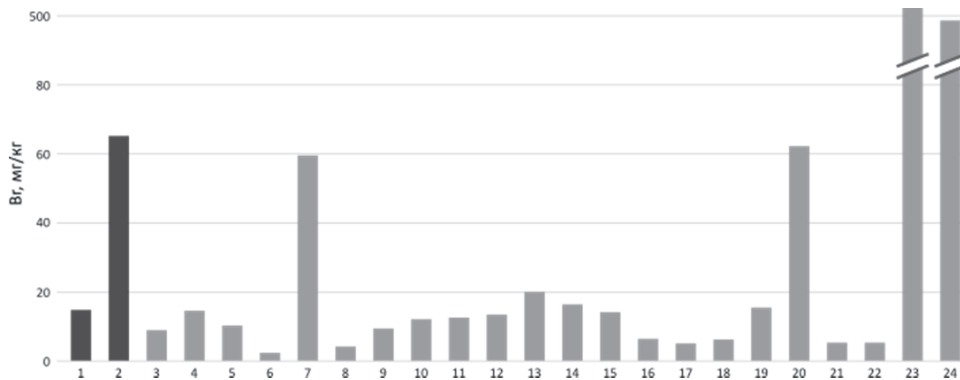
**Рис. 2.** Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в почвах населенных пунктов Томской области (1 – Pearson  $r (0,05) = 0,90$ ; объем выборки – 384 проб)

**Fig. 2.** Correlation matrix dendrogram of geochemical spectrum of elements in soils of the settlements of Tomsk region (1 – Pearson  $r (0,05) = 0,90$ ; 384 samples)

гается сравнительный анализ, основанный как на литературных данных, так и на результатах собственных исследований. Так, из рис. 3 видно, что содержания брома в различных регионах России и мира варьируются в широких пределах. Содержания брома в почвах Томской области выше концентраций, установленных для почв мира, кларковых содержаний элемента, урбанизированных почвогрунтов г. Томска, формирующихся под влиянием объектов техногенеза, а также уровней накопления, обнаруженных в почвах других регионов России.

Иная картина наблюдается при сравнении содержаний брома в почвах Томской области с зарубежными территориями. По-видимому, специфи-

ческую роль в накоплении элемента играют геоморфологические, климатогеографические и другие характеристики рассматриваемых территорий, которые значительно отличаются от природных условий Томской области. Наибольшие концентрации брома обнаруживаются в почвах Великобритании и Японии, где они могут достигать 500 мг/кг. Для обеих стран характерна близость к морю [35] и процессы вулканогенного привноса материала [36]. Возможно, влияние древних морских отложений на территории Томской области также обусловило высокое накопление брома в почвах и неоднородность его распределения на территории.



**Рис. 3.** Содержание брома в почвах регионов России и зарубежья (мг/кг): 1 – Томская область (средние содержания)\*, 2 – Томская область (максимальные содержания)\*, 3 – г. Томск [10]; 4 – г. Челябинск\*, 5 – г. Павлодар\*, 6 – респ. Бурятия\*, 7 – Западная Сибирь [5]; 8 – Васюганская равнина [5]; 9 – Кулундинская равнина (чернозем) [5]; 10 – Юго-Восточное Забайкалье [5]; 11 – Барабинская равнина [5]; 12 – Приобское плато (чернозем) [5]; 13 – г. Пиза [10]; 14 – г. Ливорно [10]; 15 – Норвегия\*; 16 – Франция\*; 17 – Китай [29]; 18 – США [30]; 19 – Иордания (без фумигантов) [31]; 20 – Иордания (с фумигантами) [31]; 21 – почвы мира [32]; 22 – кларк для почв [33]; 23 – Великобритания [30]; 24 – Япония [34]; \* – результаты собственных исследований

**Fig. 3.** Bromine content in soils of the regions of Russia and foreign countries (mg/kg): 1 – Tomsk region (average values)\*, 2 – Tomsk region (maximum values)\*, 3 – Tomsk [10]; 4 – Chelyabinsk\*, 5 – Pavlodar\*, 6 – the Buryat Republic\*, 7 – Western Siberia [5]; 8 – the Vasyugan plain [5]; 9 – the Kulunda plain (black soil) [5]; 10 – South-East Transbaikalia [5]; 11 – the Baraba plain [5]; 12 – the Ob plateau (black soil) [5]; 13 – Pisa [10]; 14 – Livorno [10]; 15 – Norway\*; 16 – France\*; 17 – China [29]; 18 – the USA [30]; 19 – Jordan (without fumigants) [31]; 20 – Jordan (with fumigants) [31]; 21 – worldwide soils [32]; 22 – soil Clarke value [33]; 23 – Great Britain [30]; 24 – Japan [34]; \* – results of own research

Таким образом, существенное влияние на накопление элемента в почвах оказывает ряд факторов, включающих как природные, так и техногенные источники, что обуславливает возможное формирование на территории области локальных геохимических аномалий.

#### Заключение

Авторами были рассмотрены особенности накопления брома в почвах населенных пунктов Томской области, а также выявлены геохимические ассоциации элемента в пределах административных районов и всей области в целом. На наш взгляд, геоморфологические, климатические, ги-

дрогелогические и другие условия имеют исключительные по своему значению геохимические последствия, влиявшие и влияющие и по сей день на характер накопления брома в почвах районов Томской области. Высокие содержания брома в почвах области носят преимущественно природный характер, за исключением некоторых из них, в которых присутствуют также и антропогенные источники элемента. Исследования брома в почвах является важной задачей, требующей дальнейшего изучения. Результаты, представленные в работе, служат базовыми материалами более детального исследования, проводимого авторами по изучению токсичности брома в почвах Томской области.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашнева Г.Е. Микро- и некоторые редкие элементы в почвах Томской области: автореф. дисс. ... канд. наук. – Томск, 1967. – 22 с.
2. Азаренко Ю.А. Закономерности содержания, распределения, взаимосвязей микроэлементов в системе почва–растение в условиях юга Западной Сибири. – Омск: Вариант-Омск, 2013. – 232 с.
3. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.
4. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 227 с.
5. Конарбаева Г.А. Галогены в почвах юга Западной Сибири. – Новосибирск: СО РАН, 2004. – 200 с.
6. Рихванов Л.П., Язиков Е.Г., Сарнаев С.И. Содержание тяжелых металлов в почвах. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 1993. – 85 с.
7. Состояние компонентов природной среды Томской области по данным эколого-геохимического мониторинга и здоровье населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Н.В. Барановская и др. // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 1 (85). – С. 29–37.
8. Евсеева Н.С., Пашнева Г.Е., Квасникова З.Н. Делювиальный процесс в агроландшафтах юга Томской области и его эколого-геоморфологические аспекты // Вестник ТГУ. Биология. – 2013. – № 4 (24). – С. 7–19.
9. Ecological Dangers of Chemical Contamination of Urban Areas Soils: Case study of Tomsk // N.A. Osipova, L.V. Zhorniyak, E.G. Yazikov, A.A. Syskina // Procedia Chemistry. – 2014. – V. 10. – P. 508–512.
10. Geochemical peculiarities of soils in Tomsk areas of industrial enterprises locations / L.V. Zhorniyak, N.A. Osipova, E.G. Yazikov, K.E. Demidova, K.Y. Osipov // Proc. SPIE. 10035. 22<sup>nd</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100354H. – November 29, 2016. [p1]
11. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: в 6 кн. Кн. 3. Редкие р-элементы / под ред. Э.К. Бурнекова. – М.: Недра, 1994. – 352 с.

12. Биогеохимические особенности накопления брома в организме человека (на примере жителей Томской области) / Н.В. Барановская, Т.А. Перминова, Б. Ларатт, Д.В. Наркович, О.А. Денисова // Вестник ОмГАУ. – 2016. – № 3 (23). – С. 155–165.
13. Bromine is an essential trace element for assembly of collagen IV scaffolds in tissue development and architecture / S. McCall et al. // Cell. – 2014. – V. 157. – P. 1380–1392.
14. Elemental concentrations of ambient particles and cause specific mortality in Santiago, Chile: a time series study / A. Valdés et al. // Environmental Health. – 2012. – V. 11. – 82 p. [p2]
15. Ehmman W.D., Vance D.E. Studies of trace element involvement in human disease by in vitro activation analysis // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 1996. – V. 203. – № 2. – P. 429–445.
16. Instrumental neutron activation analysis of urinary calculi / S.M. Lin et al. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 1985. – V. 96. – № 2. – P. 153–160.
17. Methods for land use impact assessment: a review / Т. Perminova, В. Laratte, N. Sirina, N. Baranovskaya, L. Rikhvanov // Environmental Impact Assessment Review. – 2016. – V. 60. – P. 64–74.
18. Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю. Геоэкологический мониторинг. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 336 с.
19. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саев, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
20. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.
21. Назаров А.Д. Нефтегазовая гидрохимия юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. – М.: Идея-Пресс, 2004. – 288 с.
22. Критерии ураноносности Западно-Сибирской плиты / В.А. Домаренко, Е.А. Воробьев, А.К. Мазуров и др. // Уран: Ресурсы и производство: тезисы второго международного симпозиума. – М., 26–28 ноября 2008. – М.: ВИМС, 2008. – С. 40–42.
23. Соболев И.С., Чернев Е.М. Отражение глубинного строения юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в элементном составе осадочных пород дневной поверхности // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 3. – С. 21–29.
24. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Д-Принт, 2007. – 468 с.
25. Барановская Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем: автореф. дис. ... д-ра наук. – Томск, 2011. – 46 с.
26. Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области: автореф. дис. ... канд. наук. – Томск, 2009. – 22 с.
27. Соболев И.С. О возможности изучения элементного состава снежного покрова при геохимическом картировании зон и областей внедрения глубинных флюидов (нефтегазопроисковый аспект) // Геология нефти и газа. – 2013. – № 1. – С. 68–77.
28. Bromine Compounds / D. Yoffe, R. Frim, S. Ukeles et al. // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. – P. 1–31.
29. The Nature of High Soil Radioactivity in Chinese Province Guangdong / L.P. Rikhvanov, A.N. Zlobina, N. Wang, I.A. Matveenko // Procedia Chemistry. – 2014. – V. 10. – P. 460–466.
30. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 438 с.
31. Bromine residues in the soil and fruits of certain crops after soil fumigation with methyl bromide / I.K. Nazer, A.B. Hallak, W.I. Abu-Gharbieh, N.S. Saleh // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 1982. – V. 74. – № 1–2. – P. 113–116.
32. Bowen H.J.M. Environmental chemistry of the elements / H.J.M. Bowen. – London: Academic Press, 1979. – 333p.
33. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 230 с.
34. Yuita K. Iodine, bromine and chlorine contents in soils and plants of Japan // Soil Science and Plant Nutrition. – 1983. – V. 29. – P. 403–428.
35. NSI topsoil Bromine Concentrations. URL: <http://www.ukso.org/nsi/Bromine.html> (дата обращения: 01.02.2017).
36. Bichler M., Poljanec K., Sortino F. Determination and speciation of minor and trace elements in volcanic exhalations by NAA // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles. – 1995. – V. 192. – № 2. – P. 183–194.

Поступила 07.02.2017 г.

#### Информация об авторах

**Перминова Т.А.**, аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; аспирант Технологического университета Труа.

**Барановская Н.В.**, доктор биологических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ларатт Б.**, PhD, преподаватель-исследователь Arts et Métiers ParisTech, I2M-IMC.

**Жорняк Л.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Судыко А.Ф.**, инженер кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 631.4:550.42:546.14(571.16)

## BROMINE IN THE SOILS OF TOMSK REGION

**Tatiana A. Perminova**<sup>1,2</sup>,  
tatianap1991@yandex.ru/tatianap1991@utt.fr

**Natalia V. Baranovskaya**<sup>1</sup>,  
nata@tpu.ru

**Bertrand Laratte**<sup>3</sup>,  
Bertrand.LARATTE@ensam.eu

**Lina V. Zhornyak**<sup>1</sup>,  
zhornyak\_lina@mail.ru

**Alexander F. Sudyko**<sup>1</sup>,  
afs@tpu.ru

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

<sup>2</sup> Technological University of Troyes, 12, Mari Curie street, 10010, Troyes, France.

<sup>3</sup> Arts et Métiers ParisTech, I2M-IMC,  
UMR 5295, F-33400 Talence, France.

**The research relevance.** Nowadays bromine remains one of the least studied chemical elements that, evidently, leads to the absence of any standards in some environmental media such as soil or food. Having high reactivity and migration capacity, bromine can easily penetrate to living organism through the food chain. High toxicity of bromine and its negative effects on physiological functions of living organisms define the necessity of detailed researches on this issue to be conducted. Since the soil is the primary «producer» of nutrients for plants, and, consequently, for other living organisms (including a human), the need to study its chemical composition is a high-priority objective.

**The main aim** is to study bromine content and its distribution particularities in soils of Tomsk region.

**The methods used:** the main method of the research is Instrumental neutron activation analysis.

**Results.** The paper introduces the results of the study of chemical elements in the soils of settlements in 14 districts of Tomsk region. High concentrations of bromine in the soils of certain territories were found. The comparative analysis of bromine accumulation levels in soils of Tomsk region with soils of other regions of Russia and foreign counties was carried out. Correlations of Br with other chemical elements were established. The authors have discussed possible natural and anthropogenic factors influencing the accumulation of the element.

**Findings.** The authors determined the pollution level of soils in Tomsk region and its individual districts according to the calculation of the total soil pollution index. It was found out that bromine is the only element, the values of the concentration coefficients of which exceed 10 units for soils in almost all districts of the region. It was found that the bromine contents in soils of Tomsk region are above the soil concentrations specified for soils of the world, the Clarke contents of the element as well as levels found in soils of other regions of Russia. The maximum bromine concentrations were found in the soils of Bakcharsky district.

### Key words:

Chemical elements, bromine, geochemical associations, soils, Tomsk region.

### REFERENCES

1. Pashneva G.E. *Mikro- i nekotorye redkiye elementy v pochvakh Tomskoy oblasti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Micro- and some trace elements in the soils of the Tomsk region. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1967. 22 p.
2. Azarenko Yu.A. *Zakonomernosti sodержaniya, raspredeleniya, vzaimosvyazey mikroelementov v sisteme pochva–rasteniye v usloviyakh yuga Zapadnoy Sibiri* [Peculiarities of trace elements content, distribution and relationships in the system soil–plant in the South of Western Siberia]. Omsk, Variant-Omsk Publ., 2013. 232 p.
3. Ilin V.B., Syso A.I. *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoy oblasti* [Trace elements and heavy metals in the soils of Novosibirsk region]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2001. 229 p.
4. Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri* [Laws of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007. 227 p.
5. Konarbaeva G.A. *Galogeny v pochvakh yuga Zapadnoy Sibiri* [Halogens in soils of the south of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2004. 200 p.
6. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Sarnayev S.I. *Soderzhaniye tyazhelykh metallov v pochvakh* [Heavy metals content in soils]. Tomsk, TPU Publ., 1993. 85 p.
7. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V. The state of environmental components of Tomsk region according to ecological and geochemical monitoring and public health. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2008, no. 1 (85), pp. 29–37. In Rus.
8. Evseyeva N.S., Pashneva G.E., Kvasnikova Z.N. Deluvial process in agricultural landscapes of the south of Tomsk region and its ecological-geomorphological aspects. *Vestnik TGU. Biologiya*, 2013, no. 4 (24), pp. 7–19. In Rus.

9. Osipova N.A., Zhorniyak L.V., Yazikov E.G., Syskina A.A. Ecological Dangers of Chemical Contamination of Urban Areas Soils: Case study of Tomsk. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 508–512.
10. Zhorniyak L.V., Osipova N.A., Yazikov E.G., Demidova K.E., Osipov K.Y. Geochemical peculiarities of soils in Tomsk areas of industrial enterprises locations. *Proc. SPIE. 10035. 22<sup>nd</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100354H*. November 29, 2016.
11. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov: spravochnik. Kn. 3. Redkiye p-elementy* [Environmental geochemistry of elements: a handbook. B. 3. Rare p-elements]. Ed. by E.K. Burnekova. Moscow, Nedra Publ., 1994. 352 p.
12. Baranovskaya N.V., Perminova T.A., Laratt B., Narkovich D.V., Denisova O.A. Biogeochemical features of bromine accumulation in the human body (example of Tomsk region). *Vestnik OmGAU*, 2016, no. 3 (23), pp. 155–165. In Rus.
13. McCall S. Bromine is an essential trace element for assembly of collagen IV scaffolds in tissue development and architecture. *Cell*, 2014, vol. 157, pp. 1380–1392.
14. Valdés A. Elemental concentrations of ambient particles and cause specific mortality in Santiago, Chile: a time series study. *Environmental Health*, 2012, vol. 11, 82 p.
15. Ehmann W.D., Vance D.E. Studies of trace element involvement in human disease by in vitro activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1996, vol. 203, no. 2, pp. 429–445.
16. Lin S.M. Instrumental neutron activation analysis of urinary calculi. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1985, vol. 96, no. 2, pp. 153–160.
17. Perminova T., Laratte B., Sirina N., Baranovskaya N., Rikhvanov L. Methods for land use impact assessment: a review. *Environmental Impact Assessment Review*, 2016, vol. 60, pp. 64–74.
18. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu. *Geoekologicheskii monitoring* [Geological monitoring]. Tomsk, TPU Publ., 2003. 336 p.
19. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
20. Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhorniyak L.V. *Otsenka ekologo-geokhimicheskogo sostoyaniya territorii g. Tomsk po dannym izucheniya pyleaerozoley i pochvu* [Evaluation of ecological and geochemical state of Tomsk city, according to the study of dust aerosols and soils]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Press, 2010. 264 p.
21. Nazarov A.D. *Neftegazovaya gidrokhimiya yugo-vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii* [Oil and gas hydrochemistry of the South-Eastern part of the West Siberian oil and gas province]. Moscow, Ideya-Press, 2004. 288 p.
22. Domarenko V.A., Vorobyev E.A., Mazurov A.K. Kriterii uranonochnosti Zapadno-Sibirskoy plity [Criteria for uranium-bearing aspects of the West Siberian Plate]. *Uran: Resursy i proizvodstvo. Tezisy vtorogo mezhdunarodnogo simpoziuma* [Uranium: Resources and production. Theses of the Second International Symposium]. Moscow, 26–28 November 2008. Moscow, VIMS Publ., 2008. pp. 40–42.
23. Sobolev I.S., Chernev E.M. Reflecting the deep structure of the south-eastern part of the West Siberian oil and gas province in the elemental composition of sedimentary rocks of the earth's surface. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2010, no. 3, pp. 21–29. In Rus.
24. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in Siberian coals]. Tomsk, D-Print Publ., 2007. 468 p.
25. Baranovskaya N.V. *Zakonomernosti nakopleniya i raspredeleniya khimicheskikh elementov v organizmakh prirodnykh i prirodno-antropogennykh ekosistem*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Patterns of storage and distribution of chemical elements in organisms of natural and natural-anthropogenic ecosystems. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 46 p.
26. Mezhibor A.M. *Ekogeokhimiya elementov-primesev v verkhovyykh torfakh Tomskoy oblasti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecogeochemistry of elements in peat of Tomsk region. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2009. 22 p.
27. Sobolev I.S. On the possibility of studying the elemental composition of snow cover during geochemical mapping of zones and areas of deep fluids (oil and gas exploration aspect). *Geology of oil and gas*, 2013, no. 1, pp. 68–77. In Rus.
28. Yoffe D., Frim R., Ukeles S. Bromine Compounds. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. pp. 1–31.
29. Vinogradov A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and trace elements in soils]. Moscow, AN SSSR Press, 1957. 230 p.
30. Rikhvanov L.P., Zlobina A.N., Wang N., Matveenko I.A. The Nature of High Soil Radioactivity in Chinese Province Guangdong. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 460–466.
31. Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow, Mir Publ., 1989. 438 p.
32. Bowen H.J.M. *Environmental chemistry of the elements*. London, Academic Press, 1979. 333 p.
33. Nazer I.K., Hallak A.B., Abu-Gharbieh W.I., Saleh N.S. Bromine residues in the soil and fruits of certain crops after soil fumigation with methyl bromide. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1982, vol. 74, no. 1–2, pp. 113–116.
34. Yuita K. Iodine, bromine and chlorine contents in soils and plants of Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1983, vol. 29, pp. 403–428.
35. *NSI topsoil Bromine Concentrations*. Available at: <http://www.ukso.org/nsi/Bromine.html> (accessed 1 February 2017).
36. Bichler M., Poljanc K., Sortino F. Determination and speciation of minor and trace elements in volcanic exhalations by NAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1995, vol. 192, no. 2, pp. 183–194.

Received: 7 February 2017.

#### Information about the authors

**Tatiana A. Perminova**, PhD student, National Research Tomsk Polytechnic University; Technological University of Troyes.

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

**Bertrand Laratte**, PhD, associate professor, Arts et Métiers ParisTech, I2M-IMC.

**Lina V. Zhorniyak**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander F. Sudyko**, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.2

## ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПЕЙ НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕСЕЛЕМДЖИНСКОГО ЗОЛОТОНОСНОГО УЗЛА (ПРИАМУРЬЕ)

Сафронов Петр Петрович<sup>1</sup>,  
psafronov@mail.ru

Кузнецова Инна Владимировна<sup>2</sup>,  
kuzia67@mail.ru

<sup>1</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,  
Россия, 690022, г. Владивосток-22, пр. 100-летия Владивостока, 159.

<sup>2</sup> Институт геологии и природопользования ДВО РАН,  
Россия, 675000, г. Благовещенск, пер. Релочный, 1.

*Изучение самородного золота в отработанных россыпях является актуальной задачей, поскольку скопившиеся отвалы являются, в силу значительных потерь тонкого золота при добыче, потенциальными источниками этого благородного металла.*

**Цель работы:** выяснение вещественно-минерального состояния отработанных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья с приоритетным изучением фазового состава содержащегося в них самородного золота; выявление причин, обуславливающих гетерогенность состава золота.

**Методы исследования:** энергодисперсионный рентгеноспектральный анализ, проведенный на аналитическом растровом электронном микроскопе EVO 40XVP; на основе полученных данных о составах золота для их интерпретации были построены двойные и тройные диаграммы, а также гистограмма частоты встречаемости золотоносных фаз разной пробыности.

**Результаты.** Установлена значительная неоднородность по составу большей части образцов золота. Они состоят из фаз золота разной пробы (вплоть до наивысшей – 1000 ‰), а также амальгам, представляющих собой двух-, трех- и четырехкомпонентные твердые растворы золота с ртутью, свинцом и серебром (Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb). Среди амальгам выделен целый ряд интерметаллических соединений указанных элементов. Многофазовый состав самородного золота объясняется суммирующим воздействием на него нескольких независимых процессов: 1 – химического взаимодействия золота с ртутью при извлечении этого металла во время добычи; 2 – подобного взаимодействия золота с ртутью, но меньшей интенсивности, происходящего впоследствии непосредственно в отвалах; 3 – изменений состава золота в отвалах, связанных с воздействием на него приповерхностных водных растворов. Установлено, что в техногенных россыпях Нижнеселемджинского узла преобладают золотоносные фазы высокой пробы 900–1000 ‰, что свидетельствует о перспективности данных объектов в плане их повторной отработки на золото.

### **Ключевые слова:**

Техногенные россыпи, самородное золото, амальгамы золота, интерметаллические соединения, диаграммы составов.

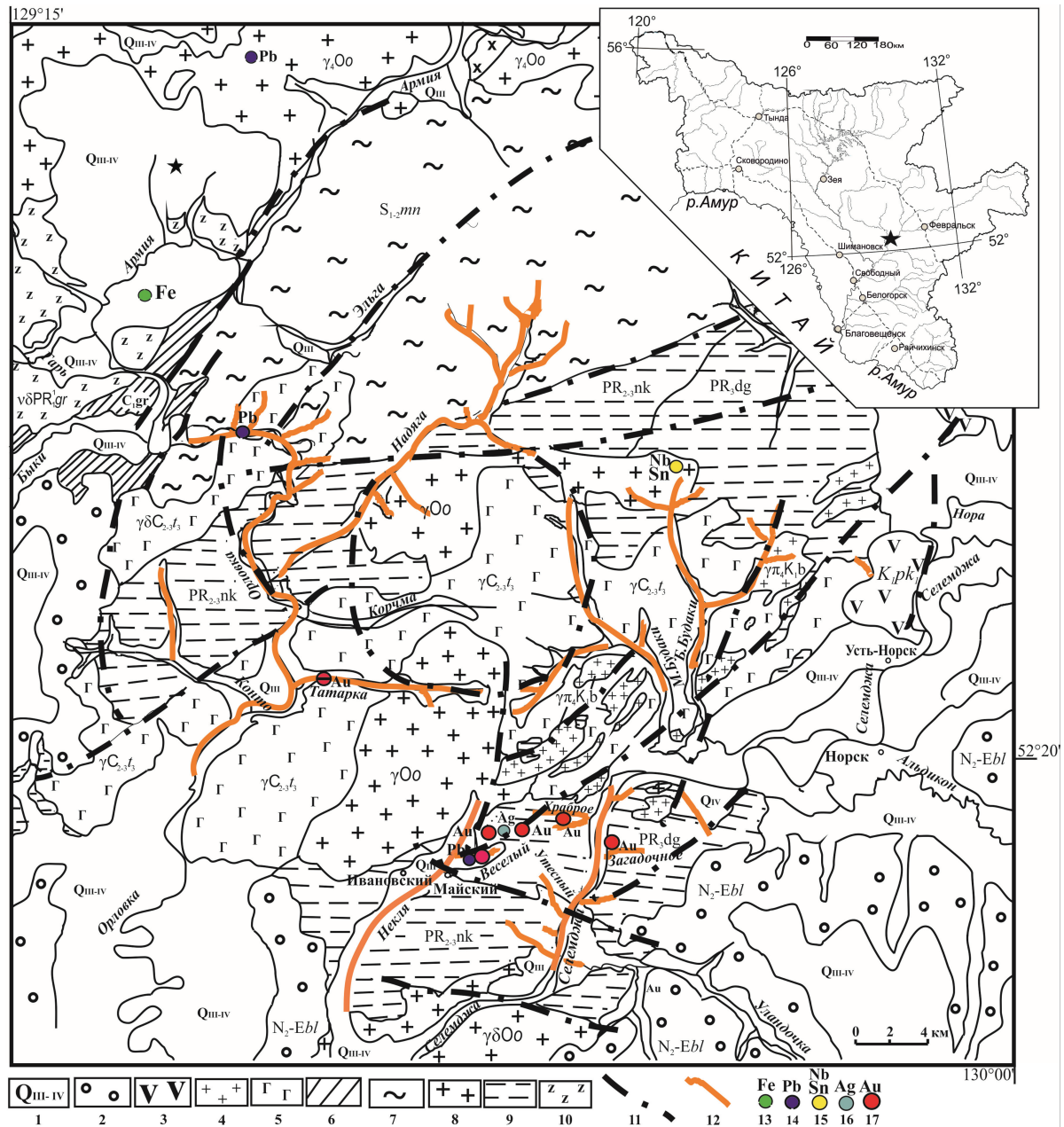
### **Введение**

В последнее время изучению самородного золота из техногенных россыпей придается большое значение по нескольким причинам. Во-первых, хорошо известно, что после отработки россыпных месторождений в них еще остается значительная часть тонкого и мелкого золота. По некоторым данным, количество золота в техногенных отвалах страны составляет не менее 18 % от запасов россыпного золота [1]. Поэтому при дальнейшем совершенствовании технологий обогащения и извлечения благородного металла золотодобытчики могут вернуться к повторной разработке россыпных месторождений. Во-вторых, для отработки соответствующих технологий специалистам необходимо иметь общее представление о химическом составе золота, содержащегося в отвалах. Известно, что для извлечения благородного металла до 1988 г. широко использовалась ртуть, а это не могло не сказаться на составе попавшего в отвалы золота. Кроме того, такое золото за время его нахождения в отвалах, которое исчисляется годами или даже десятилетиями, могло претерпеть изменения, связанные с процессами, протекающими в зоне гипергенеза, включая дополнительную химическую

амальгамацию за счет остаточной ртути. Все это также могло существенно повлиять на химический состав золота. В-третьих, золото, которое в отвалах сохранилось по тем или иным причинам неизменным, несет совместно с ассоциирующими с ним рудными и породообразующими минералами генетическую информацию о коренном источнике, из которого оно попало в россыпь. Наконец, подобные исследования важны с точки зрения экологии окружающей среды, поскольку здесь мы имеем дело с ртутью – весьма токсичным химическим элементом периодической системы.

### **Краткая геологическая характеристика**

Нижнеселемджинский золотоносный узел расположен в пределах Чагоян-Быссинской металлогенической зоны Приамурской золоторудной провинции [2] на правом берегу нижнего течения р. Селемджи (рис. 1). Для него, как и для других золотоносных узлов этой металлогенической зоны, характерно золотое оруденение преимущественно золото-кварцевого, золото-полиметаллического и золото-серебряного типов, а также россыпи с мелким и тонким золотом.



**Рис. 1.** Схематическая карта: географическое положение (отмечено на врезке), геологическое строение и рудоносность Нижнеселемджинского золотоносного узла (с использованием фондовых материалов В.Ф. Зубкова, 1980 и Д.Л. Выюнова, 2005). Условные обозначения: 1 – четвертичные образования (валуны, галька, гравий); 2 – неоген-четвертичные образования (глины, песок, галька, алевролиты); 3 – раннемеловые андезиты; 4 – раннемеловые гранит-порфиры, гранодиорит-порфиры и диоритовые порфиры; 5 – граниты и гранодиориты среднего-позднего карбона; 6 – нижнекарбонные отложения (песчаники, известняки, алевролиты); 7 – силурийские отложения (песчаники, алевролиты, конгломераты, туфы); 8 – ордовикские граниты; 9 – верхнепротерозойские терригенно-карбонатные отложения (сланцы, известняки, песчаники); 10 – раннепротерозойские габбродиориты; 11 – разломы; 12 – россыпи золота; 13–17 – рудопроявления: 13 – железа, 14 – свинца, 15 – олова и ниобия, 16 – серебра, 17 – золота

**Fig. 1.** Schematic map: geographic position (marked off on the inset), geological structure and ore content of the Nizhneselemdzhinsk gold-bearing node (the materials of V.F. Zubkov, 1980 and D.L. Vyunov, 2005 were used). Conventional signs: 1 – Quaternary formations (boulders, pebble, gravel); 2 – Neogene-Quaternary formations (clays, sand, pebble, siltstones); 3 – Early Cretaceous granite-porphyrries, granodiorite-porphyrries and diorite porphyrites; 4 – Early Carboniferous granites and granodiorites of the Middle-Late Carboniferous age; 5 – Lower Carboniferous deposits (sandstones, limestones, siltstones); 6 – Lower Carboniferous deposits (sandstones, limestones, siltstones); 7 – Silurian deposits (sandstones, siltstones, conglomerates, tuffs); 8 – Ordovician granites; 9 – Upper Proterozoic terrigenous-carbonaceous deposits (shales, limestones, sandstones); 10 – Early Proterozoic gabbro-diorites; 11 – faults; 12 – gold placers; 13–17 – ore occurrences: 13 – iron, 14 – lead, 15 – tin and niobium, 16 – silver, 17 – gold

В пределах Нижнеселемджинского золотоносного узла широко развиты россыпи золота, в основном аллювиальные, из которых с конца XIX в. добыто более 20 т благородного металла. На сегодняшний день практически все россыпи отработаны и переведены в разряд техногенных. Но работы по добыче благородного металла продолжают до настоящего времени. Основным источником золота для россыпей, скорее всего, являются не крупные золото-кварцевые жилы, а широко рассеянные по площади маломощные золотоносные кварцевые прожилки в осадочных породах, метаморфизованных в фации зеленых сланцев. Еще не выяснено, насколько широко распространена золотоносность кор выветривания в регионе, но, безусловно, такие коры являются одним из источников золота многих россыпей, а на некоторых объектах (например, ручей Веселый) служили непосредственным материалом для отработки.

#### Методика исследования

В данной работе представлены результаты детального исследования особенностей химического состава самородного золота из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья. Всего было отобрано 7 объемных проб (30–80 кг) по следующим объектам: р. Некля, руч. Веселый, р. Татарка, р. Надяга (руч. Безназванный, руч. Корейский, Косматый), р. Орловка (рис. 1). Самородное золото в виде отдельных зерен и сростков выделялось по заранее отработанной методике [3]. Его размеры колеблются от 200 мкм до 3 мм, но преобладают частицы размером 600–1000 мкм. Подготовленные образцы закреплялись на специальных столиках и изучались методом аналитической растровой электронной микроскопии (АРЭМ). Измерения составов проводились на микроскопе EVO 40XVP, оснащенный энергодисперсионным рентгеновским (ЭДР) спектрометром INCA Energy с беззотным полупроводниковым детектором. Методика измерений подробно изложена в работе [4], но в нашем случае ток электронного пучка подбирался несколько большим для лучшего статистического набора импульсов рентгеновского сигнала от образцов. В работе изучались не полированные образцы, как это принято в обычном электронно-зондовом микроанализе, а зерна в натуральном виде, что позволяло увидеть их морфологические особенности и проследить взаимоотношения золотоносной матрицы с другими минералами. При этом золотины не напылялись углеродом, поскольку они в большинстве своем являются токопроводящим материалом; кроме того, это позволило выявить природный углерод, который нередко присутствует в виде пленок на самих золотины и зачастую содержится в минеральных образованиях, находящихся в сростках с благородным металлом. Нужно отметить, что выигрышным в методе АРЭМ является его высокая локальность, в особенности при использовании в качестве источника электронов ката из гексаборида лантана.

#### Результаты исследования

Так как в образцах отобранного для изучения золота присутствует порода в виде сростаний, а также дисперсных, мелких и крупных включений (рис. 2), то анализировались все составляющие зерен и сростков. Всего проанализировано 96 образцов, выполнено несколько сотен ЭДР анализов. В данной работе в основном представлены результаты, полученные по элементному составу непосредственно самого золота. Часть предварительных результатов была показана в [5].

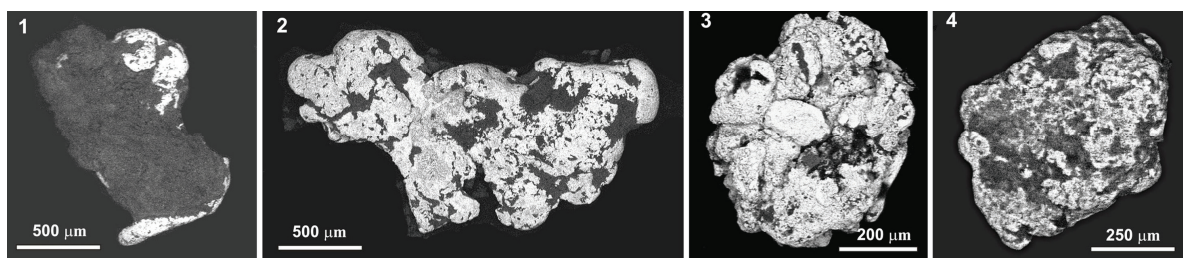
В большей части образцов в золоте установлены ртутьсодержащие фазы, представляющие собой амальгамы двухкомпонентного (Au-Hg), трехкомпонентного (Au-Ag-Hg), (Au-Hg-Pb) и четырехкомпонентного (Au-Ag-Hg-Pb) составов. В 1/3 образцов ртуть не обнаружена, вероятно, такое золото, по каким-то причинам, не соприкасалось с этим реагентом ни при добыче, ни в отвалах. Матрицы золотины, как содержащие амальгамные фазы, так и не содержащие их, представляют собой либо твердые растворы золота с серебром (Au-Ag), либо золото высшей пробы (1000 ‰), либо сочетания того и другого. Но вместе с тем установлены образцы, состоящие только из амальгамных фаз. Это наиболее прореагировавшее золото с ртутью в условиях техногенеза.

Следует отметить, что в одной пробе обнаружена свободная ртуть с примесями Pb 2,40 и As 0,25 масс. %. Ртуть локализована в участке породы, сростшейся с золотом, который состоит из смеси рудных и породообразующих минералов, содержащих Pb в форме сульфидов, сульфатов, карбонатов и алюмосиликатов. Установление ртути в свободном состоянии указывает на присутствие ее остаточных количеств в отвалах отработанных россыпей.

Что касается пород, ассоциирующих с изученным самородным золотом, то они, как правило, представляют собой тонкодисперсную смесь гидроалюмосиликатов, оксидов и гидроксидов Fe и Mn, углеродистого вещества (а иногда графита). Часто их состав каолинит-гидрослюдистый, хлорит-гидрослюдистый, лимонит-каолинитовый. В этих фрагментах пород установлены следующие минералы: каолинит, гетит, лимонит, кварц, адуляр, пирит, гидрогетит, романешит, галенит, оксид (или гидроксид) свинца, хлористый гидроксид Pb (мендипит?), медно-сурьмяно-хлористый гидроксид свинца (?), церуссит, англезит, пироморфит, U-Pb-карбонат-фосфатное соединение сложного состава и ряд др.

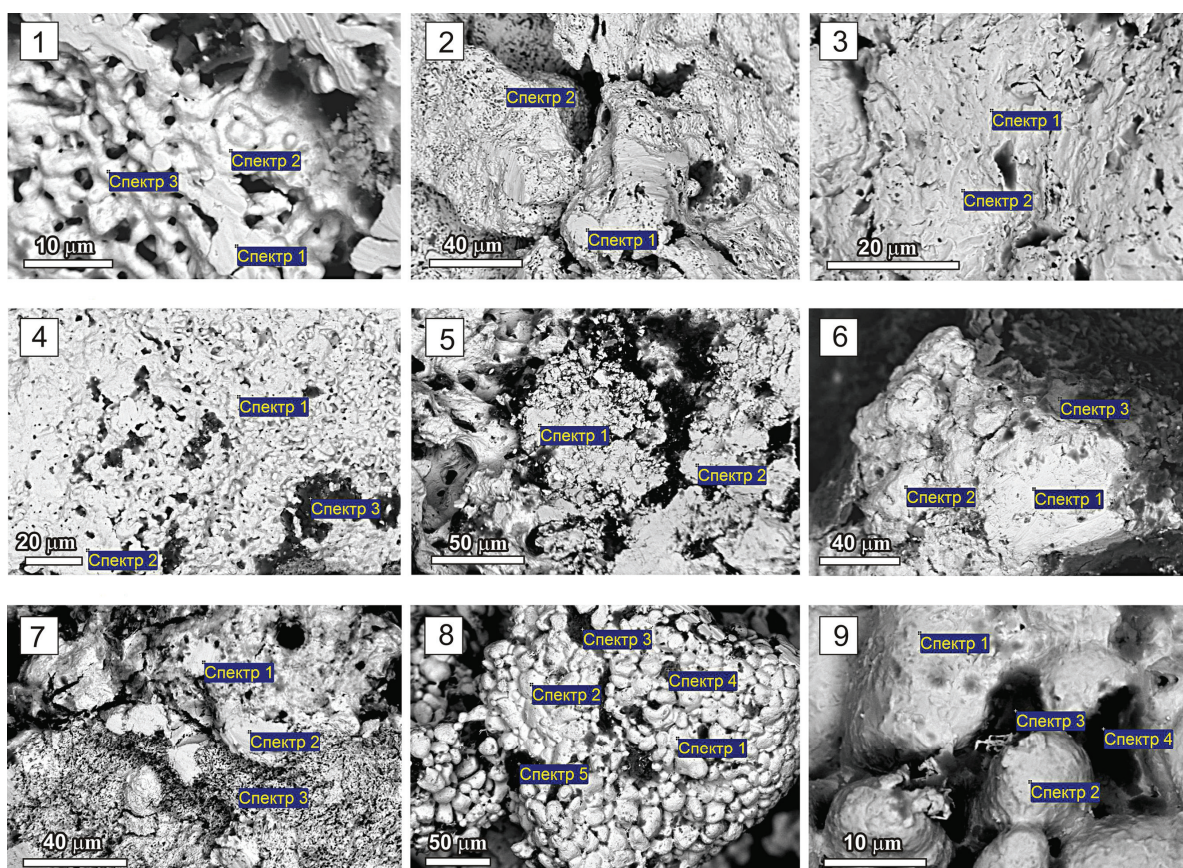
Следует отметить, что в результате гипергенных процессов произошло изменение структуры и состава ряда минералов. Так, например, галенит частично корродирован с образованием на нем микрорельефных участков из оксидов и гидроксидов свинца. Продукты преобразования галенита в виде корочек медно-сурьмяно-хлоридно-свинцового гидроксида встречаются на поверхности золотины. Нередко на золоте наблюдаются пятнистые





**Рис. 2.** Микроснимки типичных образцов самородного золота из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья. Светлое – золото, темное – порода. Снято в обратно-рассеянных электронах

**Fig. 2.** Micrography of native gold from technogenic placers of Nizhneselemdzhinsky ore cluster (Primurye). Gold is pale and rock is dark. The images were recorded with back-scattered electrons



**Рис. 3.** Микроснимки девяти участков различных образцов самородного золота с точками (спектрами) проведенных ЭДР анализов: уч. 1 – образец R5-05; уч. 2 – обр. R6-04; уч. 3 – обр. R6-12; уч. 4 – обр. R6-01; уч. 5 – обр. R2-07; уч. 6 – обр. R3-01; уч. 7 – обр. R2-09; уч. 8 – обр. R4-05; уч. 9 – тот же обр. R4-05, но при большем увеличении. Снято в обратно-рассеянных электронах

**Fig. 3.** Microphotographs of nine areas of different samples of native gold with the points (spectra) of the performed EDX analyses: plot 1 – sample R5-05; plot 2 – sample R6-04; plot 3 – sample R6-12; plot 4 – sample R6-01; plot 5 – sample R2-07; plot 6 – sample R3-01; plot 7 – sample R2-09; plot 8 – sample R4-05; plot 9 – the same sample R4-05, but with greater magnification. The photographs were taken in the backward scattered electrons

выделения англезита ( $PbSO_4$ ). Пирит, ассоциирующий с золотом, тоже часто преобразован в гидрогетит или лимонит.

Особо следует подчеркнуть, что в породе часто фиксируются примеси Au, Hg и Pb, причем в наибольших количествах Pb, который, скорее всего, находится в ней в виде соединений. Все это указывает на то, что в отвалах имели место химические реакции, связанные с различными процессами.

На небольшом примере, приведенном на рис. 3 и в таблице, показано, что золото в техногенных россыпях Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья по составу весьма разнообразно. Часть образцов (R6-04 и R5-05) отличаются высокой (~972 ‰) и наивысшей (1000 ‰) пробой, они имеют относительно однородный состав.

В этих образцах отсутствуют амальгамные фазы. В другом случае (обр. R6-12), при отсут-

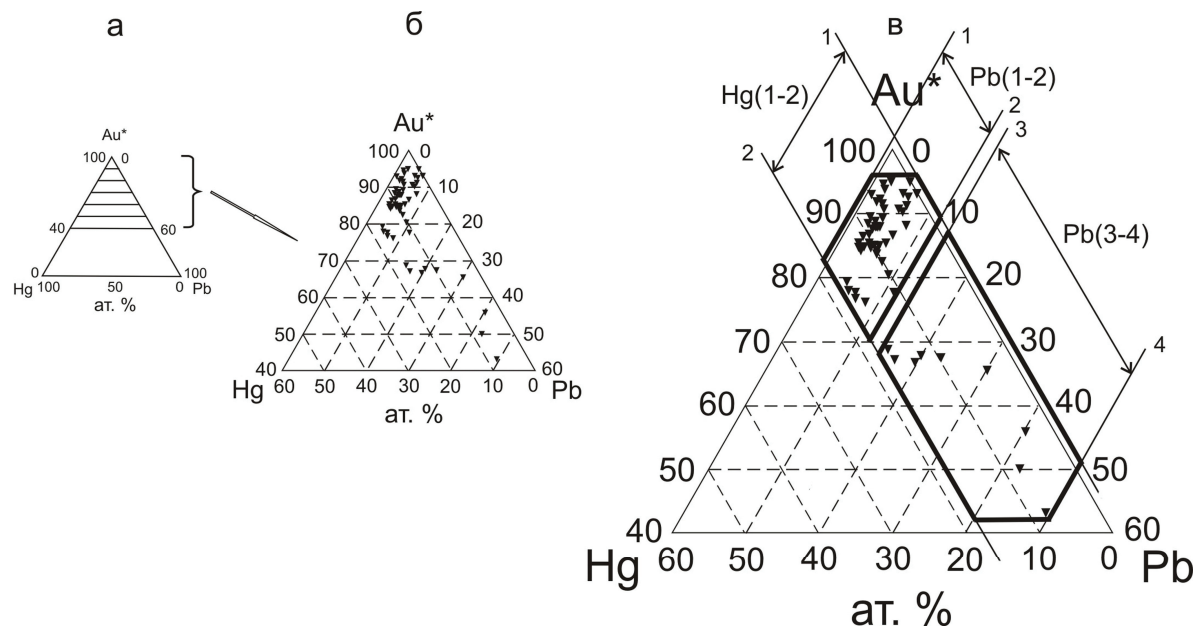
**Таблица.** Состав образцов техногенного золота, показанных на рис. 3, масс. %

**Table.** Composition of the technogene gold samples shown in Fig. 3, wt. %

Образец/Sample	R5-05		R6-04		R6-12		R6-01		R2-07
№ участка на рис. 3/Plot in Fig. 3	1		2		3		4		5
Спектр/Spectrum	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 2
Элемент/Element	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 2
Au	100,00	100,00	97,45	97,03	88,78	95,55	84,91	100,00	64,30
Ag	–	–	2,55	2,97	11,22	4,45	2,93	–	1,90
Hg	–	–	–	–	–	–	4,18	–	9,81
Pb	–	–	–	–	–	–	7,98	–	23,99
Образец/Sample	R3-01		R2-09			R4-05			
№ участка на рис. 3/Plot in Fig. 3	6		7			8		9	
Спектр/Spectrum	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 3	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2
Элемент/Element	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2	Сп 3	Сп 1	Сп 2	Сп 1	Сп 2
Au	88,78	82,11	85,81	86,49	84,41	88,62	84,35	93,39	94,22
Ag	4,04	2,60	3,85	4,26	2,03	–	–	–	–
Hg	7,18	9,62	10,34	9,25	13,50	9,00	12,21	6,61	5,78
Pb	–	5,67	–	–	–	2,38	3,44	–	–

Примечание. В таблице не приводятся анализы (спектры) ассоциирующих с золотом пород.

Note. The analyses (spectra) of the rocks associated with gold are not given in the Table.



**Рис. 4.** Диаграмма составов амальгам трехкомпонентной системы Au\*-Hg-Pb для техногенного золота Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья: а) схематическая тройная диаграмма Au-Hg-Pb; б) усеченная диаграмма с нанесенными составами амальгам; в) диаграмма с выделенными полями встречаемости составов: Hg (1-2) 0–17 ат. %; Pb (1-2) 0,5–11 %; Pb (3-4) 15–49 % (цифры округлены). Au\*=Au+Ag+Cu+Zn+Sb, где Cu, Zn и Sb – примесные элементы, установленные в ряде анализов; содержание Ag, там где оно есть, колеблется в диапазоне 0,8–7,5 ат. %; в одном случае Ag=11,75 %

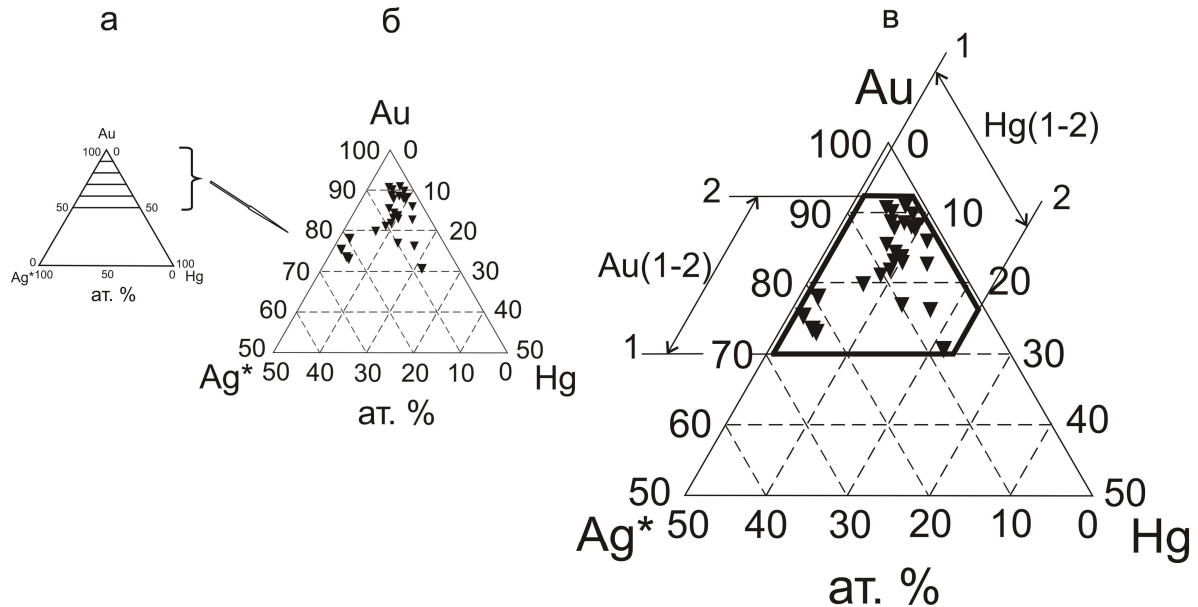
**Fig. 4.** Diagram of amalgam compositions of the Au\*-Hg-Pb three-component system for the technogene gold of the Nizhne-selemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye: а) schematic triple Au-Hg-Pb diagram; б) truncated diagram with the plotted compositions of amalgams; в) diagram with the marked out fields of the composition occurrence: Hg (1-2) 0–17 at. %; Pb (1-2) 0,5–11 %; Pb (3-4) 15–49 % (numbers are round). Au\*=Au+Ag+Cu+Zn+Sb, where Cu, Zn and Sb are the impurity elements determined in some analyses; Ag content, where it was found, ranges within 0,8–7,5 at. %; in one case Ag=11,75 %

ствии амальгамных фаз, золото отличается гетерогенным составом – концентрации Au и Ag в соседних зонах существенно разнятся. Установлены образцы (R6-01 и др.), в которых, несмотря на то, что ряд участков в них состоят из амальгам, матрица Au имеет состав с пробой 1000 ‰. В золоте, которое прореагировало с ртутью

(обр. R2-07, R3-01, R2-09, R4-05 и R6-01), амальгамы обладают непостоянным составом. В этих фазах содержания ртути и свинца колеблются: Hg от 4 до 13, Pb от 0 до 24 масс. %. Таким образом, характерной особенностью золота техногенных россыпей является гетерогенность его химического состава.

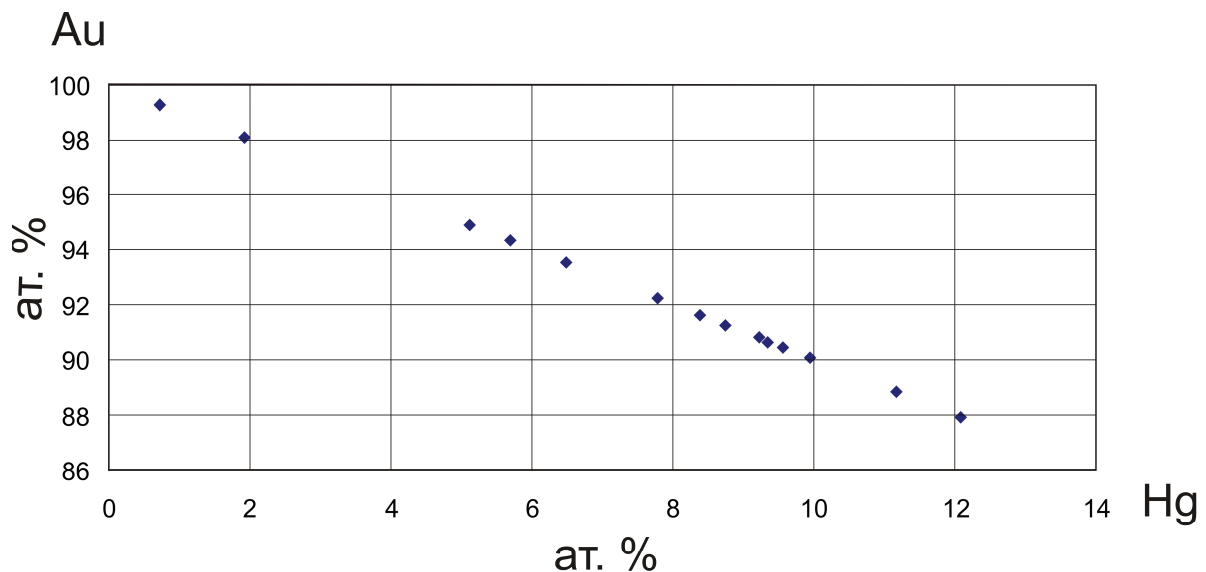
Среди изученных амальгам количественно преобладают Pb-содержащие трехкомпонентные Au-Hg-Pb и четырехкомпонентные Au-Ag-Hg-Pb фазы. Наиболее представительные составы этих фаз нанесены на тройную диаграмму Au\*-Hg-Pb (рис. 4). При этом Au объединено с Ag, поскольку концентрации последнего чаще всего составляют

несколько процентов. Из диаграммы видно, что концентрация золота в Pb-содержащих амальгамах варьирует от 43 до 95 ат. %, хотя преобладают фазы, содержащие Au от 77 до 95 ат. %. Содержания ртути не превышают 17 ат. % (поле Hg (1-2) на рис. 4, в). Концентрации свинца в амальгамах изменяются в более широком диапазоне – от



**Рис. 5.** Диаграмма составов амальгам трехкомпонентной системы Au-Ag\*-Hg для техногенного золота Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья: а) схематическая тройная диаграмма Au-Ag-Hg; б) усеченная диаграмма с нанесенными составами амальгам; в) диаграмма с выделенным полем составов для Au (1-2) 71-91 ат. % и для Hg (1-2) 1,5-21 % (цифры округлены).  $Ag^* = Ag + Cu + Sb$ , где Cu и Sb – примесные элементы, установленные в ряде анализов

**Fig. 5.** Diagram of amalgam compositions of the Au-Ag\*-Hg three-component system for the technogene gold of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye: а) schematic triple Au-Ag-Hg diagram; б) truncated diagram with the plotted compositions of amalgams; в) diagram with the marked out fields of compositions for Au (1-2) 71-91 at. % and for Hg (1-2) 1,5-21 % (numbers are round).  $Ag^* = Ag + Cu + Sb$ , where Cu and Sb are the impurity elements determined in some analyses



**Рис. 6.** Диаграмма составов амальгам двухкомпонентной системы Au-Hg для техногенного золота Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья

**Fig. 6.** Diagram of amalgam compositions of the Au-Ag two-component system for the technogene gold of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye

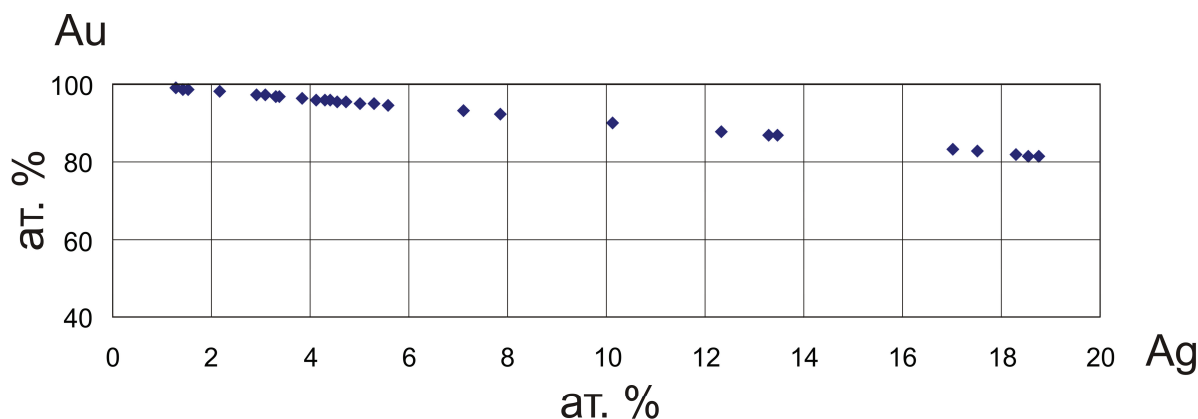


Рис. 7. Диаграмма составов твердых растворов золота с серебром для техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья (здесь не отражено золото пробы 1000 ‰)

Fig. 7. Diagram of compositions of solid solutions of gold with silver for the technogene placers of the Nizhneselemdzhnsky gold-bearing node of Priamurye (gold of the 1000 ‰ fineness is not shown here)

0,5 до 49 ат. %. При этом на диаграмме для этого элемента выделены два поля составов: поле Pb (1–2) – часто встречающиеся составы с концентрацией Pb от 0,5 до 11,2 ат. %; поле Pb (3–4) – реже встречающиеся фазы с концентрацией Pb от 14,8 до 49,2 ат. %.

Наиболее показательные составы амальгам другой трехкомпонентной системы Au-Ag-Hg отображены на тройной диаграмме (рис. 5). Они сосредоточены в основном в верхней части диаграммы (рис. 5, в). Диапазон концентраций Au (1–2) в данных фазах составляет 70,9–91,3 ат. %, а Hg (1–2) 1,5–21,2 %.

Составы амальгам двухкомпонентной системы Au-Hg, не содержащих серебра, представлены на рис. 6. Концентрация золота в таких амальгамах изменяется в диапазоне 87,9–99,3 ат. %, ртути – от 0,7 до 12,1 ат. %. Данные составы относятся, согласно диаграмме состояния системы золото–ртуть, приведенной в [6], к  $\alpha$ -твердым растворам ( $\alpha$ -тв. р.) Au-Hg на основе золота.

Золото, не подвергнутое воздействию ртути, зачастую является практически чистым, его проба 1000 ‰. Остальные фазы самородного золота представляют собой твердые растворы Au с Ag. Составы этих фаз отражены на диаграмме Au-Ag (рис. 7), из которой видно, что содержание Ag меняется от 1,5 до 19 ат. % (~0,7–11 масс. %), при этом значительная часть составов попадает в область концентраций Ag от 1,5 до 6 ат. %.

#### Обсуждение результатов

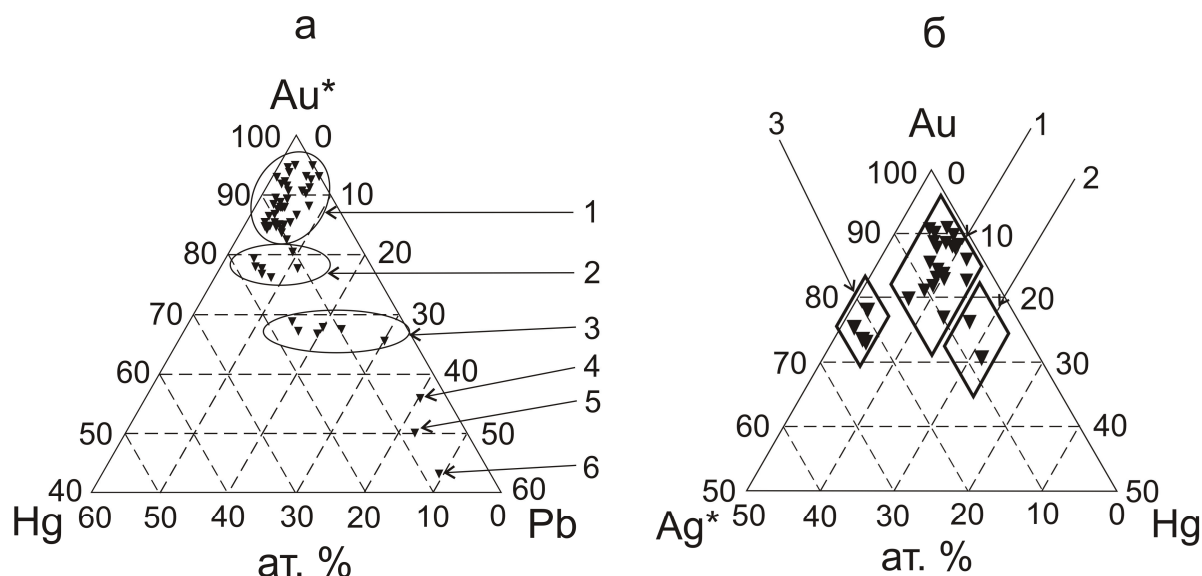
Основная часть данных ЭДР анализов представлена на диаграммах (рис. 4–7). Что касается двойных диаграмм (рис. 6 и 7), то они отражают составы твердых растворов Au с Hg и Au с Ag. Причем в первом случае ртутьсодержащие фазы, как уже было отмечено, являются  $\alpha$ -твердыми растворами двухкомпонентной системы Au-Hg.

Сложнее обстоит дело с тройными диаграммами. Если на них выделить поля встречаемости нес-

колько по-иному (рис. 8, а, б), чем это сделано на рис. 4 и 5, то вырисовывается следующая картина.

На диаграмме Au\*-Hg-Pb (рис. 8, а) выделяется несколько полей – 1, 2, 3, и точки 4, 5, 6. В поле 1 попадает наибольшее количество составов, которые варьируют около некоторого среднего состава, описываемого кристаллохимической формулой  $(Au,Ag)_6(Hg,Pb)_1$ . В связи с этим можно с большой долей вероятности утверждать, что данное поле отвечает условиям существования твердых растворов на основе интерметаллического соединения  $(Au,Ag)_9(Hg,Pb)_1$ . Составы фаз в поле 2 описываются кристаллохимической формулой  $(Au,Ag)_4(Hg,Pb)_1$ . Данное соединение схоже с интерметаллическим соединением  $(Au,Ag)_4Hg_1$ , обнаруженным в системе Au-Ag-Hg, только здесь, т. е. в системе Au\*-Hg-Pb, в интерметаллиде присутствует Pb от 3 до 11 ат. %. В поле 3 составы соответствуют стехиометрическому соединению  $(Au,Ag)_2(Hg,Pb)_1$ . Состав 4 отвечает соединению  $Au_4(Hg,Pb)_3$ . Состав фазы 5 отвечает формуле  $Au_1(Hg,Pb)_1$ , а фаза 6 соответствует стехиометрии  $Au_3(Hg,Pb)_4$ . Природные соединения подобны фазам 5 и 6 установлены в работе [4].

В системе Au-Ag\*-Hg (рис. 8, б) на диаграмме выделяются три поля составов, хотя в поле 2 – всего только две точки, а в поле 3 – четыре точки. Наибольшее количество обнаруженных фаз попадает в поле 1. Содержание ртути в этих фазах варьирует в относительно узком диапазоне концентраций, примерно от 5 до 13 ат. %, при среднем значении ~9 %. Это дает право предположить, что установленные фазы представляют собой твердые растворы на основе соединения  $(Au,Ag)_6Hg_1$ , о котором, так же как и о соединении  $(Au,Ag)_9(Hg,Pb)_1$ , практически нет сведений в литературе. По предположению авторов [7] из соединения  $Au_9Hg_1$  могли состоять первичные амальгамные каймы, впоследствии разложившиеся. Кстати, формулы интерметаллических соединений для 1-го поля в системах Au\*-Hg-Pb и Au-Ag\*-Hg схожи, они рассчитываются на 10 атомов. Только в первом случае в состав



**Рис. 8.** Тройные диаграммы составов амальгам золота из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья: а – система Au\*-Hg-Pb: 1 – поле существования твердых растворов на основе соединения  $(Au, Ag)_5(Hg, Pb)_1$ ; 2 – поле составов с формулой  $(Au, Ag)_4(Hg, Pb)_1$ ; 3 – поле составов с формулой  $(Au, Ag)_2(Hg, Pb)_1$ ; 4 – фаза с составом  $Au_4(Hg, Pb)_3$ ; 5 – фаза с составом  $Au_4(Hg, Pb)_1$ ; 6 – фаза с составом  $Au_3(Hg, Pb)_4$ . Au\*=Au+Ag+Cu+Zn+Sb для тех составов где присутствуют Ag и примеси Cu, Zn, Sb. Но в целом ряде составов примеси указанных элементов отсутствуют; б – система Au-Ag\*-Hg: 1 – поле существования твердых растворов на основе соединения  $(Au, Ag)_5Hg$ ; 2 – два состава близкие к стехиометрическому соединению  $(Au, Ag)_4Hg$ ; 3 – поле твердых растворов Au-Ag\*-Hg с низким содержанием ртути. Ag\*=Ag+Cu+Sb для тех составов, где присутствуют примеси Cu, Sb. Но в целом ряде составов примеси указанных элементов отсутствуют

**Fig. 8.** Triple diagrams of gold amalgam compositions from the technogene placers of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye: а – Au\*-Hg-Pb system: 1 – field of existence of solid solutions on the base of the  $(Au, Ag)_5(Hg, Pb)_1$  compound; 2 – field of compositions with the  $(Au, Ag)_4(Hg, Pb)_1$  formula; 3 – field of compositions with the  $(Au, Ag)_2(Hg, Pb)_1$  formula; 4 – phase with the  $Au_4(Hg, Pb)_3$  composition; 5 – phase with the  $Au_4(Hg, Pb)_1$  composition; 6 – phase with the  $Au_3(Hg, Pb)_4$  composition; Au\*=Au+Ag+Cu+Zn+Sb for the compositions where Ag and the admixtures of Cu, Zn, and Sb are present. But in a large variety of compositions the admixtures of these elements are absent; б – Au-Ag\*-Hg system: 1 – field of existence of solid solutions on the base of  $(Au, Ag)_5Hg$  compound; 2 – two compositions close to the stoichiometric  $(Au, Ag)_4Hg$  compound; 3 – field of the Au-Ag\*-Hg solid solutions with low content of mercury. Ag\*=Ag+Cu+Sb for the compositions where the Cu and Sb admixtures are present. But in a large variety of compositions the admixtures of these elements are absent

еще изоморфно входит Pb. Составы 2-го поля описываются кристаллохимической формулой  $(Au, Ag)_4Hg_1$ . Это техногенное соединение – аналог природной фазы, обнаруженной в образцах другого региона (в Приморье) [4]. К 3-му полю с наименьшими содержаниями ртути относятся амальгамы, находящиеся, скорее всего, в виде тонких пленок на поверхности золотин и являющиеся твердыми растворами Au-Ag-Hg.

Таким образом, в техногенном золоте установлены, наряду с практически чистым золотом и сплавами Au-Ag, многочисленные амальгамные фазы, представляющие собой двух-, трех- и четырехкомпонентные твердые растворы Au с Hg, Pb и Ag, а именно Au-Hg ( $\alpha$ -тв. р.), Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb. Среди трех- и четырехкомпонентных составов выделены интерметаллические соединения со следующими кристаллохимическими формулами:  $Au_1(Hg, Pb)_1$ ,  $(Au, Ag)_2(Hg, Pb)_1$ ,  $(Au, Ag)_4Hg_1$ ,  $(Au, Ag)_4(Hg, Pb)_1$ ,  $Au_3(Hg, Pb)_4$ ,  $Au_4(Hg, Pb)_3$ ,  $(Au, Ag)_9Hg_1$  и  $(Au, Ag)_9(Hg, Pb)_1$ . Кроме того, в отвалах обнаружена почти чистая ртуть (Hg).

Нужно подчеркнуть, что в ряде золотоносных месторождений (гипогенных и гипергенных), при-

сутствует эндогенное ртутистое золото. Кратко такая информация дается в [8]. Важные сведения о природных твердых растворах и интерметаллических соединениях в системах Au-Hg и Au-Ag-Hg приведены в [9, 10]. А в работе [11] при изучении «нового» экзогенного золота непосредственно установлены фазы  $Au_5Hg$  и  $Au_3Hg$ . Следует также добавить, что примеси природной ртути (от десятых долей процента до нескольких %) выявлены в золоте многих эндогенных месторождений Дальнего Востока [12]. Кроме того, в других регионах существуют золото-ртутистые эндогенные месторождения разных формационных типов [13]. Опираясь на обширные данные по изученности золота в различных золотоносных месторождениях, в которых нередко участвует ртуть, можно заключить, что в отвалах какая-то доля обнаруженных золото-ртутистых интерметаллидов может быть эндогенного происхождения.

Важными характеристиками самородного золота (рудного, россыпного и техногенного) являются его проба и частота встречаемости различной пробы. Проведенные расчеты пробы по формуле  $Au/(Au+Ag^*) \times 1000$  (где  $Ag^*$ =либо Ag, либо

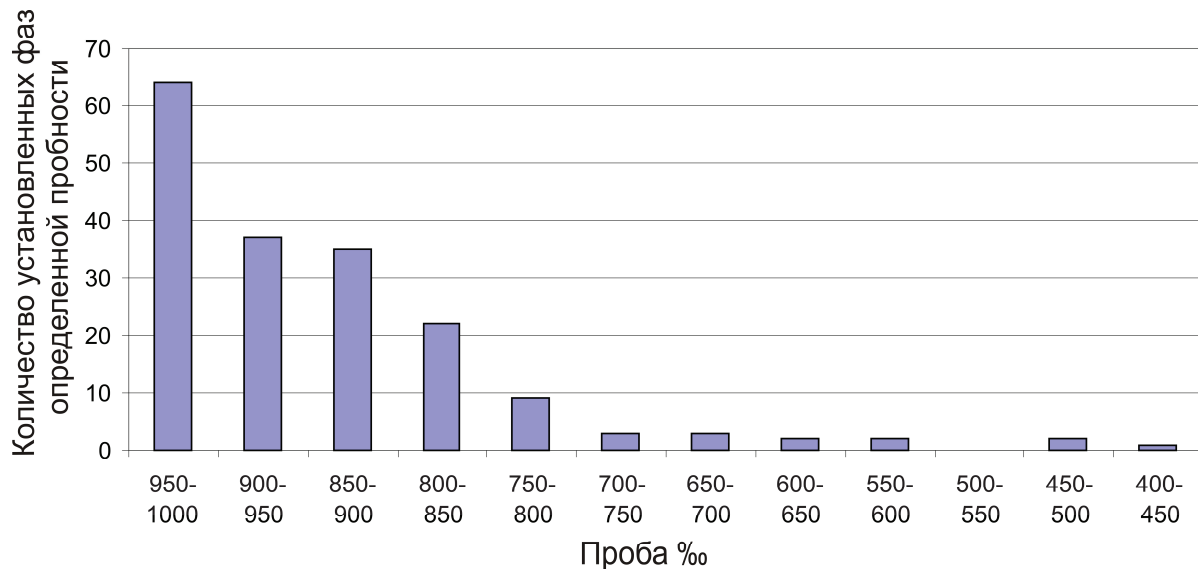


Рис. 9. Гистограмма частоты встречаемости (ось ординат) разной пробы золотоносных фаз (ось абсцисс) в самородном золоте техногенных россыпей Нижнеселемджинского узла (Приамурье)

Fig. 9. Histogram of frequency of occurrence (axis of ordinates) of gold-bearing phases of different fineness (axis of abscissas) in native gold of technogene placers of the Nizhneselemdzhinsky node (Priamurye)

Ag+Hg, либо Ag+Hg+Pb) для всех фаз техногенного золота как ртуть- и свинецсодержащих, так и свободных от этих элементов, и построенная гистограмма частоты встречаемости этих фаз разной пробыности (рис. 9) показывают, что в исследуемом золоте преобладают высокопробные фазы (950–1000 ‰). Сопоставимы между собой по встречаемости фазы с пробой двух других высокопробных интервалов: 900–950 и 850–900 ‰. А в сумме все эти фазы составляют ~ 75 % от общего количества техногенного золота. И только 25 % приходится на низкопробные ( $\leq 850$  ‰) фазы.

По данным предшественников для первичных россыпей рассматриваемого района характерно высокопробное золото (891–950 ‰), оно составляет почти 98 %. И только не более 5 % приходится на низкопробное золото [8, 14]. То есть при формировании техногенных россыпей произошло не только увеличение в общей массе золота высокопробного (от 900 до 1000 ‰), но также увеличилось количество золота низкой пробы ( $\leq 850$  ‰). По-видимому, в отвалах содержится золото различного генезиса, в том числе остаточное – плутоногенное и вулканогенное. Сростки золота с кварцем и высокая проба значительной части золота указывают на распространение на территории Нижнеселемджинского узла коренных источников малосульфидного золото-кварцевого формационного типа. Наличие в Au включений адуляра, наряду с золотом с халцедоновидного кварца, свидетельствуют о том, что часть золота поступала в россыпи за счет разрушения месторождений вулканогенного золото-серебряного типа [15]. Повышенная золотоносность галенита и сростки золота с галенитом и англезитом позволяют предположить присутствие в этом золотоносном узле про-

явлений золото-сульфидно-кварцевого или золото-полиметаллического минерального типа [2, 16]. А частая встречаемость весьма высокопробного золота в сростании с метасоматитами каолинит-гидрохлоритового, хлорит-гидрохлоритового, лимонит-каолинитового и др. составов указывает на то, что часть золота формировалась в низкотемпературных близповерхностных условиях на завершающей стадии гидротермально-метасоматического процесса или при химическом выветривании [17–20]. Наблюдаемые на золотинах каймы из пористого ажурного высокопробного (1000 ‰) благородного металла свидетельствуют о формировании в россыпях «нового» золота [2, 11].

Следует отметить, что особенностью техногенного золота Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья является наличие в его составе значительного количества Pb-содержащих амальгам. Это может быть следствием того, что различные минералы свинца, присутствующие в рудах и вмещающей породе, а также нередко сопровождающие золото в россыпях, частично или полностью разлагались в условиях гипергенеза с образованием подвижных комплексных соединений Pb, и, вероятно, свободных атомарных его форм. Последние, соединяясь с Hg и Au, образовывали Pb- и Hg-содержащие золотоносные фазы различного состава.

Большая часть самородного золота с амальгамными фазами, которое попало в отвалы, несомненно, является продуктом реакций благородного металла с ртутью, происходивших во время его добычи из россыпей. Меньшая доля подобного многофазного золота образовалась уже непосредственно в отвалах за счет взаимодействия остаточной ртути, находящейся там в контакте с частицами золота.

Кроме того, наличие такой ртути в отвалах могло также вызвать дополнительные изменения фазового состава уже ранее амальгамированного во время добычи золота и теперь присутствующего в отвалах.

Нельзя также сбрасывать со счетов влияние метеорных вод на минералы и обломки пород в золотоносных отвалах. Благодаря атмосферным осадкам (дожди, паводки, талые воды от снегов и пр.) на территории отвалов происходило смешение различных поверхностных вод, в число которых входили воды с сопредельных территорий, обогащенные органикой. Смешанные воды, имея повышенный окислительно-восстановительный потенциал, в течение длительного времени многократно пропитывали толщи отвалов, взаимодействуя с веществом последних, тем самым в отвалах формировались специфические грунтовые воды, а по существу, низкотемпературные дренирующие растворы. Под действием таких растворов в отвалах протекали сложные процессы, в частности растворение, выщелачивание, окисление, гидратация, замещение, гидролиз их компонентов. Свой вклад в эти реакции могли вносить также и бактерии [21–24]. На фоне сложного взаимодействия этих растворов с рудными минералами и обломками пород происходило растворение наиболее мелких и субмелких частиц золота, в том числе его амальгамных фаз, а также облагораживание поверхностных слоев более крупных частиц. При этом в раствор переходили Au, Hg и Pb, которые в дальнейшем, при благоприятных условиях, могли осаждаться на родственные частицы-подложки и за счет самоэпитаксии укрупнять последние, а также частично изменять их фазовый состав. Кроме того, эти элементы из растворов могли абсорбироваться породами и минералами, обладающими рыхлой структурой. В качестве подтверждения этому, в метасоматических породах, находящихся в тесных сростаниях с золотом, обнаружены, как уже ранее отмечалось, примеси указанных элементов.

#### Выводы

Выполненные исследования самородного золота техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья показывают:

1. Основная его масса имеет гетерогенный состав, обусловленный наличием различных фаз, включая амальгамы варьирующего состава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья // Горный журнал. – 2008. – № 6. – С. 71–74.
2. Кузнецова И.В. Геология, тонкодисперсное и наноразмерное золото в минералах россыпей Нижнеселемджинского узла (Приамурье): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Красноярск. 2011. – 21 с.
3. Моисеенко В.Г. От атомов золота через кластеры, нано- и микроскопические частицы до самородков благородного металла. – Благовещенск: ДВО РАН. Амурское отделение РМО, 2007. – 187 с.

В индивидах золота, кроме фаз наивысшей пробы 1000 ‰ и твердых растворов золота с серебром, установлены многочисленные вновь образованные фазы амальгам, которые представляют собой двух-, трех- и четырехкомпонентные твердые растворы золота с ртутью, свинцом и серебром (Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb). Среди амальгам выделен целый ряд интерметаллических соединений указанных элементов –  $Au_1(Hg,Pb)_1$ ,  $(Au,Ag)_2(Hg,Pb)_1$ ,  $(Au,Ag)_3Hg_1$ ,  $(Au,Ag)_4(Hg,Pb)_1$ ,  $Au_3(Hg,Pb)_4$ ,  $Au_4(Hg,Pb)_3$ ,  $(Au,Ag)_9Hg_1$  и  $(Au,Ag)_9(Hg,Pb)_1$ .

2. Выявленная многофазность состава техногенного золота объясняется суммарным результатом действия нескольких независимых процессов: 1) химического взаимодействия золота с ртутью во время его добычи в россыпях; 2) аналогичных взаимодействий, но меньшей интенсивности, в последующее время непосредственно в отвалах; 3) изменений состава части остаточного золота, связанных с воздействием на него в отвалах низкотемпературных растворов гипергенного происхождения.
3. Установлено, что в техногенных россыпях Нижнеселемджинского узла существенно преобладают золотоносные фазы высокой пробы 900–1000 ‰.
4. Составы самородного золота и ассоциирующих с ним пород отражают возможные формационные типы коренных источников для россыпей, присутствующих на этой территории.
5. Обнаружение в пробах, помимо золотоносных амальгам, свободной ртути указывает на высокое загрязнение этим элементом техногенных отвалов, что может способствовать процессам дальнейшей амальгамации находящегося там золота и усложнению его фазового состава. Наличие техногенной ртути в отвалах также негативно отражается на экологии тех районов, где производилась добыча благородного металла с ее применением.
6. При разработке новых технологий для более полного извлечения благородного металла из техногенных россыпей следует учитывать то обстоятельство, что золото в них, в отличие от исходного, как правило, имеет более сложный многофазовый и многокомпонентный состав.

4. Самородные металлы и интерметаллиды в аллювии мокрушинской площади таухинского террейна (юго-восточный Сихотэ-Алинь) / В.Т. Казаченко, С.Н. Лаврик, Е.В. Перевозникова, П.П. Сафронов, Н.В. Сосарева // Записки Российского минералогического общества. – 2014. – Ч. СХЛШ. – № 3. – С. 85–105.
5. Сафронов П.П., Кузнецова И.В. О фазовом составе самородного золота техногенных россыпей Приамурья // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: IV Всеросс. науч. конф. – Благовещенск, ИТиП ДВО РАН, 5–7 октября 2016. – Т. 1. – С. 116–119.
6. Вол А.Е., Каган И.К. Строение и свойства двойных металлических систем. Т. 3. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 815 с.

7. Наумов В.А., Наумова О.Б. Преобразование золота в техногенных россыпях // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 531–532.
8. Неронский Г.И. Типоморфизм золота месторождений Приамурья. – Благовещенск: АмурНЦ ДВО РАН, 1998. – 320 с.
9. Новгородова М.И. Кристаллохимия самородных металлов и природных интерметаллических соединений // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Кристаллохимия. – 1994. – Т. 29. – С. 1–154.
10. Gold Behavior in Supergene Profiles under Changing Redox Conditions: the Example of the Las Cruces Deposit, Iberian Pyrite Belt / L. Yesares, T. Aiglsperger, R. Saez, G.R. Almodovar, J.M. Nieto, J.A. Proenza, C. Gomez, J.M. Escobar // Econ. Geol. – 2015. – V. 110. – P. 2109–2126.
11. «Новое» золото в россыпях Приамурья / Г.И. Неронский, П.П. Сафронов и др. // Глубинное строение Тихого океана и его континентального обрамления. Ч. 3. – Благовещенск: АмурКНИИ ДВО РАН СССР, 1988. – С. 55–56.
12. Савва Н.Е., Шиляева Н.А., Алевская Н.Л. Топоминералогия конституционных особенностей самородного золота Нижне-Амурского россыпного района. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. – 173 с.
13. Наумов В.А., Борисенко А.С., Гущина Л.В. Ртутистое золото: критерий поиска коренных источников разных типов золотого орудинения и условия его образования. URL: <http://www.min-soc.ru/FilesBase/E2-2011-1-0.pdf> (дата обращения: 25.05.2016).
14. Неронский Г.И., Добрая В.Т. Особенности состава золота из россыпей Нижнеселемджинского района // Амурский крайвед. – Благовещенск: Амурское отд. Хабаровского книж. изд-ва, 1975. – С. 86–100.
15. Morphogenesis and composition of native gold in the Chelopech volcanic-hosted Au–Cu epithermal deposit, Srednogie zone, Bulgaria / I.K. Bonev, T. Kerestedjian, R. Atanassova et al. // Mineralium Deposita. – August 2002. – V. 37. – Iss. 6. – P. 614–629.
16. Insights from Pb Isotopes for Native Gold Formation During Hypogene and Supergene Processes at Rich Hill, Arizona / G.D. Kamenov, E.B. Melchiorre, F.N. Ricker, E. DeWitt // Economic Geology. – November 1, 2013. – V. 108. – P. 1577–1589.
17. Hough R.M., Noble R.R.P., Reich M. Natural gold nanoparticles // Ore Geol. Rev. – 2012. – V. 42. – P. 55–61.
18. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon / A. Vishitia, C.E. Suha, B. Lehmann et al. // Journal of African Earth Sciences. – November 2015. – V. 111. – P. 1–13.
19. Asaad M.B. Moufti. Opaque mineralogy and resource potential of placer gold in the stream sediments between Duba and Al Wajh, Red Sea coast, northwestern Saudi Arabia // Journal of African Earth Sciences. – November 2014. – V. 99. – P. 1. – P. 188–201.
20. Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison «Garimpo», Amazon, Brazil // Journal of South American Earth Sciences. – 2008. – V. 25. – P. 359–376.
21. Nanoparticle factories: Biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation // F. Reith et al. // Geology. – September 1, 2010. – V. 38. – P. 843–846.
22. The biogeochemistry of gold / G. Southam, M.F. Lengke, L. Fairbrother, F. Reith // Elements. – October 1, 2009. – V. 5. – P. 303–307.
23. Shuster J., Southam G. The in-vitro «growth» of gold grains // Geology. – January 1, 2015. – V. 43. – P. 79–82.
24. Rea M.A., Zammit C.M., Reith F. Bacterial biofilms on gold grains-implications for geomicrobial transformations of gold // FEMS Microbiology Ecology. – June 2016. – V. 92. – Iss. 6. – P. 1–12.

*Поступила 20.01.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Сафронов П.П.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

**Кузнецова И.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории наноминералогии Института геологии и природопользования ДВО РАН.



UDC 553.2

## SPECIAL FEATURES OF COMPOSITION OF NATIVE GOLD FROM TECHNOGENE PLACERS ON THE EXAMPLE OF THE NIZHNESELEMDZHINSKY GOLD-BEARING NODE (PRIAMURYE)

**Petr P. Safronov**<sup>1</sup>,  
psafronov@mail.ru

**Inna V. Kuznetsova**<sup>2</sup>,  
kuzia67@mail.ru

<sup>1</sup> Far East Geological Institute Far East Branch Russian Academy of Sciences,  
159, Prospect 100-letya of Vladivostok, Vladivostok-22, 690022, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Geology and Nature Management of Far East Branch Russian Academy of Sciences,  
1, Relochny Lane, Blagoveshchensk, 675000, Russia.

*The study of native gold in the exhausted placers is an urgent task as the accumulated dumps are the potential sources of gold because of the significant loss of fine gold through the extraction.*

**The aim** of the research is to elucidate the substance-mineral state of the exhausted placers of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node in Priamurye with primary study of phase composition of native gold enclosed in them; reveal the reasons responsible for heterogeneity of gold composition.

**Methods of investigations:** energy-dispersion X-ray spectral analysis carried out using the analytical raster electron microscope EVO 40XVP; to interpret the obtained data on gold compositions the authors have constructed the binary and triple diagrams for them and the histograms of the occurrence frequency of gold-bearing phases of different purity.

**Results.** The authors determined the significant composition heterogeneity of most of gold samples. They consist of gold phases of different purity (up to the highest one – 1000 ‰) and amalgams represented by two-, three-, and four-component solid solutions of gold with mercury, lead, and silver (Au-Hg, Au-Ag-Hg, Au-Hg-Pb, Au-Ag-Hg-Pb). The whole set of intermetallic compounds of these elements was recognized among the amalgams. The multiphase composition of native gold is explained by the summary action of several independent processes on it: 1 – chemical interaction of gold with mercury through the extraction of this metal during mining; 2 – similar interaction of gold with mercury but of less intensity that takes place later immediately in the dumps; 3 – changes of gold composition in the dumps due to the action of the near-surface water solutions on it. It was defined that the technogene placers of the Nizhneselemdzhinsky node are dominated by the gold-bearing phases of a high purity – 900–1000 ‰ that indicates the perspective repeated processing of these placers for gold.

### Key words:

Technogene placers, native gold, gold amalgam, intermetallic compounds, diagrams of compositions.

### REFERENCES

- Chanturia V.A., Vigdergauz V.E. Innovative technologies of processing technogenic mineral raw materials. *Gornyi journal*, 2008, no. 6, pp. 71–74. In Rus.
- Kuznetsova I.V. *Geologiya, tonkodispersnoe i nanorazmernoe zoloto v mineralakh rossyep Nizhneselemdzhinskogo uzla (Priamure)*. Dis. Kand. nauk [Geology, fine and nano-gold in minerals of placers in Nizhnesaldinsky node (the Amur region). Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2011. 21 p.
- Moiseenko V.G. *Ot atomov zolota cherez klasteri, nano- i mikroskopicheskie chastitsy do samorodkov blagorodnogo metalla* [From gold atoms through the clusters, nano- and microscopic particles to nuggets of precious metal]. Blagoveshchensk, Feb RAS, RMS Publ., 2007. 187 p.
- Kazachenko V.T., Lavrik S.N., Perevoznikova E.V., Safronov P.P., Kosareva N. Native metals and intermetallic compounds in alluvium mokrushinskaya area of taukhinsky terrane (South-East Sikhote-Alin). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2014, P. XLIII, no. 3, pp. 85–105. In Rus.
- Safronov P.P., Kuznetsova I.V. O fazovom sostave samorodnogo zolota tekhnogenykh rossyep Priamurya [On phase composition of native gold in technogenic placers of the Amur region]. *Voprosy geologii i kompleksnogo osvoeniya prirodnykh resursov Vostochnoy Azii. IV Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya* [Issues of Geology and complex development of natural resources of the East Asia. IV All-Russian scientific conference]. Blagoveshchensk, 2016. Vol. 1, pp. 116–119.
- Vol A.E., Kagan I.K. *Stroenie i svoystva dvoynnykh metallicheskih sistem* [Structure and properties of double metallic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1976. Vol. 3, 815 p.
- Naumov V.A., Naumova O.B. Preobrazovanie zolota v tekhnogenykh rossyepakh [Gold transformation in technogenic placers]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 5, pp. 531–532.
- Neronsky G.I. *Tipomorfizm zolota mestorozhdeniy Priamurya* [Typomorphism of gold of the Amur region deposits]. Blagoveshchensk, Feb RAS Publ., 1998. 320 p.
- Novgorodova M.I. Kristallokhimiya samorodnykh metallov i prirodnykh intermetallicheskih soedineniy [Crystallochemistry of native metals and natural intermetallic compounds]. *Itogi nauki i tekhniki* [The results of science and technology]. *VINITI. Ser. Kristallokhimiya*, 1994, vol. 29, pp. 1–154.
- Yesares L., Aiglsperger T., Saez R., Almodovar G.R., Nieto J.M., Proenza J.A., Gomez C., Escobar J.M. Gold Behavior in Supergene Profiles under Changing Redox Conditions: the Example of the Las Cruces Deposit, Iberian Pyrite Belt. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 2109–2126.
- Neronsky G.I., Safronov P.P. «Novoe» zoloto v rossyepakh Priamurya [«New» gold in placers of the Amur region]. *Glubinnoe stroenie Tikhogo okeana i ego kontinentalnogo obramleniya: Trudy Mezhdunarodnogo Simpoziuma* [Proc. Int. Simp. Deep structure of the Pacific ocean and its continental framing]. Blagoveshchensk, 1988. Vol. 3, pp. 55–56.
- Savva N.E., Shilyaeva, N.A., Alaska N.L. *Topomineralogiya konstitutsionnykh osobennostey samorodnogo zolota Nizhne-Amur*

- skogo rossypnogo rayona* [Topomineralogy of constitutional peculiarities of native gold in lower Amur placer district]. Magadan, SVKNII FEB RAS Publ., 2004. 173 p.
13. Naumov V.A., Borisenko A.S., Gushchina L.V. *Rtutistoe zoloto: kriteriy poiska korennykh istochnikov raznykh tipov zolotogo orudiniya i usloviya ego obrazovaniya* [Lode gold: criteria of searching for indigenous sources of different types of gold mineralization and conditions of its formation]. Available at: <http://www.minsoc.r/E2-2011-1-0/> (accessed 25 May 2016).
  14. Neronsky G.I., Dobraya V.T. *Osobennosti sostava zolota iz rossy-py Nizhneselendzhinskogo rayona* [Features of gold from placers of Nizhneselendzhinsky district]. Blagoveshchensk, Amur Department of the Khabarovsk book Publ., 1975. pp. 86–100.
  15. Bonev I.K., Kerestedian T., Atanassova R. Morphogenesis and composition of native gold in the Chelopech volcanic-hosted Au–Cu epithermal deposit, Srednogorie zone, Bulgaria. *Mineralium Deposita*, 2002, vol. 37, no. 6, pp. 614–629.
  16. Kamenov G.D., Melchiorre E.B., Ricker F.N., DeWitt E. Insights from Pb Isotopes for Native Gold Formation During Hypogene and Supergene Processes at Rich Hill. *Arizona Economic Geology*, 2013, vol. 108, no. 1, pp. 1577–1589.
  17. Hough R.M., Noble R.R.P., Reich M. Natural gold nanoparticles. *Ore Geol. Rev.*, 2012, vol. 42, pp. 55–61.
  18. Vishitia A., Suha C.E., Lehmann B. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 2015, vol. 111, pp. 1–13.
  19. Asaad M.B. Moutfi. Opaque mineralogy and resource potential of placer gold in the stream sediments between Duba and Al Wajh, Red Sea coast, northwestern Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, vol. 99, no. 1, pp. 188–201.
  20. Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison «Garimpo», Amazon, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2008, vol. 25, pp. 359–376.
  21. Reith F. Nanoparticle factories: Biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation. *Geology*, 2010, vol. 38, pp. 843–846.
  22. Southam G., Lengke M.F., Fairbrother L., Reith F. The biogeochemistry of gold. *Elements*, 2009, vol. 5, pp. 3–307.
  23. Shuster J., Southam G. The in-vitro «growth» of gold grains. *Geology*, 2015, vol. 43, pp. 79–82.
  24. Rea M.A., Zammit C.M., Reith F. Bacterial biofilms on gold grains—implications for geomicrobial transformations of gold. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, vol. 92, no. 6, pp. 1–12.

Received: 20 January 2017.

#### Information about the authors

**Petr P. Safronov**, Cand. Sc., senior researcher, Far East Geological Institute Far East Branch Russian Academy of Sciences.

**Inna V. Kuznetsova**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology and Nature Management of Far East Branch Russian Academy of Sciences.

УДК 550.8.055:550.845

## ЛАБОРАТОРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ, ВЫНОСИМЫХ ИЗ СКВАЖИН, МЕТОДОМ ЯМР-РЕЛАКСОМЕТРИИ

Шумскайте Мария Йоновна<sup>1</sup>,  
ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

Глинских Вячеслав Николаевич<sup>1,2</sup>,  
GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Бортникова Светлана Борисовна<sup>1</sup>,  
BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Харитонов Андрей Николаевич<sup>3</sup>,  
Andrey@nadym-dobycha.gazprom.ru

Пермяков Виктор Сергеевич<sup>3</sup>,  
Permyakov.VS@nadym-dobycha.gazprom.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

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

<sup>3</sup> ООО «Газпромдобыча Надым», Россия, 629730, г. Надым, ул. Пионерская, 14.

**Актуальность.** Своевременная диагностика жидкости, выносимой из скважин, позволяет на начальной стадии их эксплуатации выявить возникновение обводнения и разрушения призабойной зоны. В настоящее время диагностика жидкой фазы проводится в лабораторных условиях на основе гидрохимического анализа отобранных проб воды. Этот метод даёт исчерпывающую информацию об ионно-солевом и микрокомпонентном составе исследуемых жидкостей. Оперативность диагностики в большинстве случаев имеет особо важное значение, что обуславливает необходимость поиска альтернативных методов и подходов к экспресс-изучению скважинных жидкостей. Таким методом является ЯМР-релаксометрия, применение которого в комплексе с гидрохимическими данными позволяет эффективно типизировать жидкости, выносимые из скважин.

**Цель работы:** развитие метода ЯМР-релаксометрии применительно к решению задачи диагностики жидкости, выносимой из скважин, на основе зависимости времени поперечной релаксации от концентрации парамагнитных ионов.

**Методы исследования:** расширенный гидрохимический анализ, включающий определение ионно-солевого и микроэлементного состава, а также лабораторный метод импульсной ЯМР-релаксометрии, направленный на определение времен поперечной релаксации.

**Результаты.** С использованием данных лабораторного гидрохимического анализа о ионно-солевом и микрокомпонентном составе жидкостей, выносимых из скважин, на основе проведенных ЯМР-исследований экспериментально подтверждено, что время поперечной релаксации существенно зависит от изменения концентрации парамагнитных ионов металлов. Установлена зависимость времени поперечной релаксации от содержания ионов кальция и натрия, по которым выделяют техногенную и пластовую воды по результатам гидрохимического анализа, что составляет основу для оперативной типизации по ЯМР-данным жидкости, выносимой из скважин. Эта зависимость позволяет однозначно выделять техногенную воду, характеризующуюся повышенным содержанием парамагнитных ионов металлов.

### Ключевые слова:

Ядерно-магнитный резонанс, релаксационные характеристики, пластовая жидкость, физико-химические свойства, гидрохимический анализ.

### Введение

В продукции нефтегазовых скважин всегда содержится жидкость, которая в зависимости от стадии и условий эксплуатации скважины отличается по физико-химическому составу. При отсутствии осложнений в работе скважины эта жидкость – конденсационная вода. После проведения капитального ремонта скважины резко увеличивается содержание техногенной жидкости, состоящей из остатков растворов, применяемых при ремонте. Появление подошвенной воды свидетельствует о начале обводнения скважины –

быстро развивающемся процессе, который сопровождается интенсивным разрушением призабойной зоны пласта и создаёт опасность для технологического оборудования. Именно поэтому диагностика жидкости, выносимой из скважин, является актуальной задачей контроля за разработкой нефтяных и газовых месторождений. Эффективность ее решения обусловлена оперативностью исследований, чтобы уже на начальной стадии эксплуатации скважины выявлять проблемы возникновения заводнения и разрушения призабойной зоны.

Для этого в работе проводится лабораторная диагностика жидкостей методами гидрохимического анализа и импульсной ЯМР-релаксометрии, которые позволяют оперативно получать информацию о составе и свойствах жидкостей, выносимых из скважин. Аналитические методы гидрохимического анализа дают исчерпывающую информацию о ионно-солевом и микрокомпонентном составе жидкостей. Лабораторный метод ЯМР-релаксометрии хорошо зарекомендовал себя при исследованиях керна и пластовых флюидов и позволяет дополнить результаты гидрохимического анализа новыми данными об изменении физико-химических свойств жидкостей в зависимости от химического состава [1–9].

Идея работы состоит в том, что измеряемые в методе ЯМР характеристики существенно зависят от концентрации парамагнитных ионов металлов, таких как  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ . Этот эффект составляет основу для оперативной диагностики жидкости, выносимой из скважин, с использованием лабораторного метода ЯМР-релаксометрии.

#### Гидрохимический анализ и ЯМР-релаксометрия проб жидкостей

Выполнен лабораторный гидрохимический анализ и ЯМР-релаксометрия 20 проб жидкостей, выносимых из скважин на Юбилейном, Ямсовейском и Медвежьем месторождениях ЯНАО.

Расширенный лабораторный гидрохимический анализ проб включал измерение значений водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала, электропроводности, содержания хлоридов, основных катионов и микроэлементов. Результаты ЯМР-исследований сопоставлялись с содержанием основных анионов, катионов и микроэлементов.

Содержание хлорид-ионов определялось потенциометрическим методом на портативном ионнометре ЭКСПЕРТ-001–3.0.4 (Эконикс-Эксперт) с помощью ионселективного электрода ЭЛИТ-261С1. Катионы и микроэлементы определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре OPTIMA-2000-DV (Perkin Elmer). ЯМР-характеристики определялись на ЯМР-релаксометре «МСТ-05» с рабочей частотой 2,2–2,3 МГц (Магнитные системы и технологии). Долевое соотношение разных типов вод в изучаемых жидкостях рассчитывалось по стандартной методике, предложенной ИПНГ РАН для геолого-технических условий рассматриваемых месторождений [10].

Изученные пробы жидкости имеют очень контрастные характеристики, частично состав проб приведен в работе [11]. По значениям pH среда растворов изменяется от слабокислой (pH=5,33) до слабощелочной (pH=7,5). Минерализация и концентрации элементов также существенно различаются. Определяющий анион – Cl<sup>-</sup> находится в концентрациях от 0,98 до 27000 мг/л. Содержание основных катионов колеблется в пределах 2–4 порядков, концентрации микроэлементов изменяются ещё больше. Вследствие существенного различия составов жидкостей время поперечной релаксации ( $T_2$ ), соответствующее максимальной амплитуде ЯМР-спектра, меняется от 40 до 2000 мс (табл. 1).

Гидрохимический анализ показал, что в рассматриваемой выборке нет двух жидкостей идентичного состава. В каждой пробе присутствуют различные типы жидкостей (пластовая, конденсационная, техногенная) в разном долевом соотношении. Так, высокое содержание хлоридов  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$  в пробах указывает на некоторую

**Таблица 1.** Значения  $T_2$  (мс) проб жидкостей и концентрации элементов (мг/л)

**Table 1.**  $T_2$  value of fluid samples and element concentrations (mg/l)

№ пробы/Sample no.	$T_2$	Cl	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Ba	Sr	Li
1	294,6	4000,0	1200,0	23,0	45,0	230,0	8,0	4,0	1,8	6,4	28,0
2	509,7	9300,0	3700,0	18,0	60,0	270,0	13,0	2,6	0,9	7,0	4,1
3	139,2	730,0	200,0	5,1	7,5	45,0	17,0	7,2	0,3	0,7	0,8
4	473,1	570,0	190,0	8,0	6,6	70,0	0,3	1,8	0,3	1,0	0,3
5	634,9	220,0	38,0	5,7	4,8	47,0	0,1	0,7	0,1	0,3	0,2
6	1765,0	21000,0	180,0	67,0	35,0	4000,0	0,1	0,9	8,5	27,0	0,3
7	1982,6	160,0	1,7	0,2	1,2	11,0	2,2	0,01	0,03	0,007	37,0
8	33,0	17000,0	5300,0	61,0	47,0	590,0	280,0	31,0	3,9	20,0	57,0
9	551,5	1800,0	460,0	8,0	7,7	42,0	12,0	1,3	1,1	1,4	67,0
10	291,8	17000,0	7900,0	45,0	109,0	530,0	42,0	3,4	6,0	22,0	1,5
11	367,6	19000,0	350,0	95,0	33,0	3810,0	0,8	2,7	3,4	15,0	7,4
12	77,1	7500,0	1500,0	27,0	9,7	340,0	61,0	14	1,1	6,3	7,0
13	1526,0	1,0	0,5	0,2	0,4	2,1	0,1	0,008	0,001	0,004	0,1
14	1544,1	17,0	13,0	4,0	1,6	3,6	0,1	0,02	0,04	0,07	0,1
15	1353,0	1700,00	240,0	84,0	28,0	4010,0	0,1	1,3	7,4	28,0	0,5
16	172,5	10000,0	3370,0	47,0	24,0	680,0	44,0	6,3	3,6	21,0	0,1
17	159,9	13000,0	4500,0	60,0	30,0	470,0	74,0	6,6	4,4	25,0	0,1
18	1403,7	21,0	9,3	1,9	0,2	1,7	0,1	0,3	0,06	0,1	0,01
19	41,5	2700,0	7100,0	120,0	76,0	1100,0	49,0	27	6,0	38,0	1,1
20	779,4	350,0	34,0	4,5	1,5	66,0	11,0	1,0	0,08	0,2	0,4

долю пластовых вод в этой жидкости. Содержание ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в сочетании с высокой минерализацией и хлоридами характерно для техногенных вод. Жидкости, состоящие преимущественно из конденсационной воды, как правило, имеют повышенную кислотность по сравнению с пластовыми и техногенными водами, существенно более низкую электропроводность и минимальные концентрации макро- и микроэлементов.

В целом же по данным гидрохимического анализа техногенная вода характеризуется повышенным содержанием ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , пластовая же вода характеризуется высоким содержанием ионов  $\text{Na}^+$ .

На основании гидрохимических данных все пробы разделены на 3 группы: конденсационная, пластовая и техногенная вода, для которых определена процентная доля каждого типа воды в каждой пробе (табл. 2).

**Таблица 2.** Разделение проб жидкостей по долевым соотношениям разных типов воды

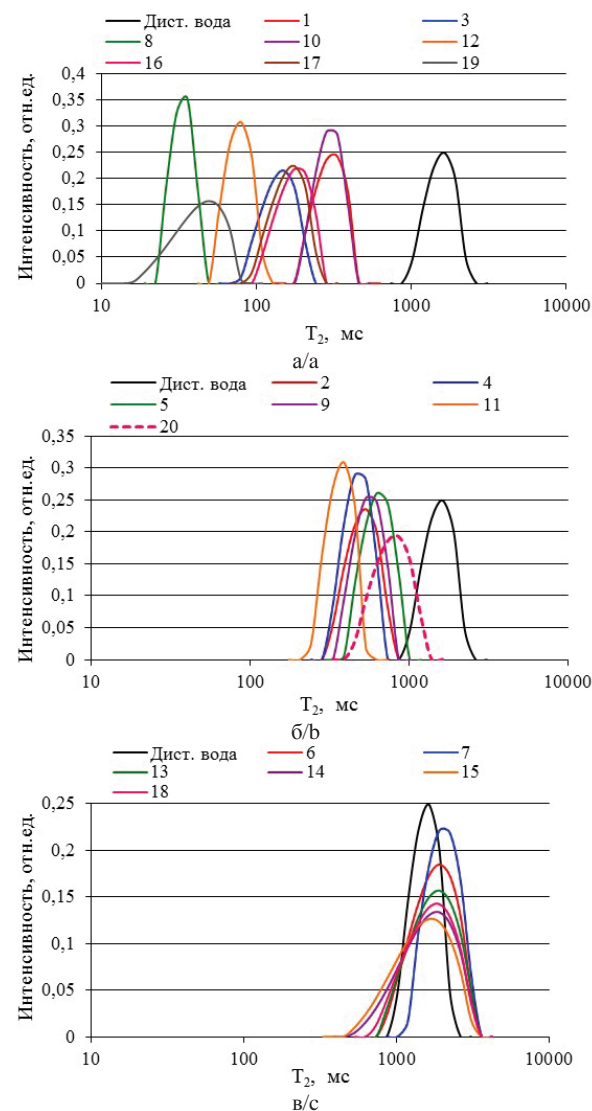
**Table 2.** Separation of fluid samples according to the equity proportion of the different water types

№ пробы Sample no.	Доля воды/Water content, %		
	Конденсационной Condensate	Пластовой Formation	Техногенной Technogenous
1	86	0	14
2	64	0	36
3	98	0	2
4	98	0	2
5	99	0	1
6	19	81	0
7	97	0	2
8	0	17	83
9	89	0	11
10	0	0	100
11	0	100	0
12	80	0	20
13	100	0	0
14	100	0	0
15	3	92	0
16	61	0	39
17	53	0	47
18	100	0	0
19	0	9	91
20	99	0	1

На этой основе проведён анализ ЯМР-характеристик проб, изменяющихся в зависимости от генетической принадлежности жидкости. Определение ЯМР-характеристик различных пластовых флюидов основано на контрасте их коэффициентов диффузии и разном распределении  $T_2$  нефти и газа в зависимости от РТ-условий. Несмотря на изменчивость ЯМР-характеристик, сигналы от разных типов флюидов часто можно спрогнозировать или определить при наличии данных лабораторных измерений [12–19].

Полученные ЯМР-спектры проб жидкостей, выносимых из скважин, разделяются на три группы. Первая группа характеризуется короткими  $T_2$  (<500 мс) и относится к техногенной воде, вторая – пластовая вода с  $T_2=350–1500$  мс и третья – конден-

сационная вода с наибольшими  $T_2$  (~2000–2500 мс). Водородосодержание всех проб составляет в среднем 93–99 %, ширина спектров и их амплитуда существенно отличаются друг от друга и от дистиллированной воды, с которой проводится сравнение всех жидкостей (рис. 1).



**Рис. 1.** Спектры по временам поперечной релаксации техногенной (а), пластовой (б) и конденсационной (в) вод. Шифры спектров соответствуют номерам проб жидкостей

**Fig. 1.** Spectra of the transverse relaxation times of the technogenous (a), formation (b) and condensate (c) water. Ciphers of spectra correspond to the numbers of fluid samples

Первая группа жидкостей – техногенная вода, характеризующаяся короткими  $T_2$  (рис. 1, а). По данным гидрохимического анализа к техногенной воде (её содержание в пробе >80 %) относятся пробы 8, 10 и 19. Эти пробы отражены на ЯМР-спектрах первой группы. На графике присутствуют и другие пробы жидкостей с короткими  $T_2$ , которые по ЯМР-данным также относятся к техногенной воде, но по данным гидрохимического ана-

лиза – нет. Это пробы 1, 3, 12, 16, 17, которые относятся к конденсационно-техногенным водам (табл. 2). ЯМР-метод однозначно определяет техногенную воду, которая характеризуется повышенным содержанием ионов  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , поскольку эти элементы значительно уменьшают  $T_2$ .

Вторая группа проб жидкостей – пластовая вода (рис. 1, б). Это вода с минерализацией 17–20 г/л, характеризующаяся по данным гидрохимического анализа повышенным содержанием ионов  $Na^+$ . По данным гидрохимического анализа к пластовой воде (содержание воды в пробе >80 %) относятся пробы 6, 11 и 15. На ЯМР-спектрах присутствует только проба 11. Оставшиеся на графике спектры проб 2, 4, 5, 9 и 20 по данным гидрохимического анализа относятся к конденсационно-техногенной воде с разным содержанием этих типов воды (табл. 2). Пробы 6 и 15 по ЯМР-данным относятся к конденсационной воде.

Поскольку спектры по  $T_2$  конденсационных и пластовых вод перекрываются, бывает трудно разделить эти два типа жидкостей, выносимых из скважин. Это связано с тем, что в составе этих проб существенно отличаются только концентрации ионов  $Cl^-$  и  $Na^+$ , которые практически не оказывают влияния на ЯМР-сигнал.

Конденсационная вода (близка по составу к дистиллированной воде) по данным гидрохимического анализа характеризуется повышенной концентрацией ионов  $Ba^{2+}$  и  $K^+$ . По данным гидрохимического анализа к конденсационной воде (содержание в пробе >80 %) относятся пробы 1, 3, 4, 5, 7, 9, 12–14, 18 и 20. На ЯМР-спектрах (рис. 1, в) присутствуют пробы 7, 13, 14 и 20. Оставшиеся на графике спектры проб 6 и 15 по данным гидрохимического анализа относятся к конденсационно-пластовой воде (табл. 2). На графике нет спектров проб 1, 3, 4, 5, 9, 12 и 20, которые по ЯМР-данным относятся к техногенной воде (пробы 1, 3 и 12) и пластовой (пробы 4, 5, 9, 20). Это объясняется тем, что в пробах 1, 3 и 12 повышенное содержание ионов  $Fe^{3+}$  и  $Ca^{2+}$ , наличие которых приводит к значительному уменьшению  $T_2$ . Пробы жидкостей, попавшие в группу пластовой воды по ЯМР-данным, содержат ионы, увеличивающие  $T_2$ , поэтому их спектры оказались смещенными вправо относительно спектра дистиллированной воды.

На графиках (рис. 1) видно, что значения  $T_2$  первой группы проб жидкостей на порядок короче, чем у дистиллированной воды, у пластовых вод (по ЯМР-данным)  $T_2$  также существенно меньше, чем у дистиллированной воды.

Как известно [20], скорость релаксации прямо пропорциональна количеству парамагнитных включений и описывается выражением:

$$\frac{1}{T_2} = aC_{\text{пм}},$$

где  $1/T_2$  – скорость релаксации;  $C_{\text{пм}}$  – концентрация парамагнитных включений;  $a$  – коэффициент пропорциональности.

Наблюдаемое значительное смещение ЯМР-спектров в сторону коротких  $T_2$  обусловлено повышенным содержанием парамагнитных ионов таких металлов, как  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ . В табл. 3 приведены значения магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) для этих элементов.

**Таблица 3.** Магнитная восприимчивость некоторых химических элементов

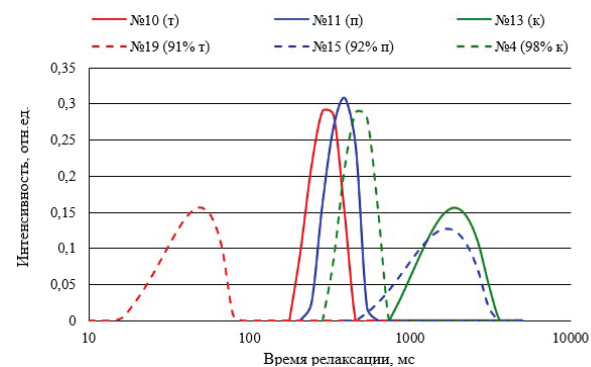
**Table 3.** Magnetic susceptibility of some chemical elements

Магнитная восприимчивость Magnetic susceptibility	Li	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe	Ba
$\chi$	+0,50	+0,51	+0,55	+0,52	+1,10	+9,9	>1100	+0,91

Детальный анализ влияния концентраций парамагнитных включений на ЯМР-спектры позволяет точнее разделять жидкости, выносимые из скважин, на техногенную, пластовую или конденсационную воды и объясняет различия между результатами гидрохимического анализа и ЯМР-релаксометрии.

#### Анализ ЯМР-свойств проб жидкостей и сопоставление с данными гидрохимического анализа

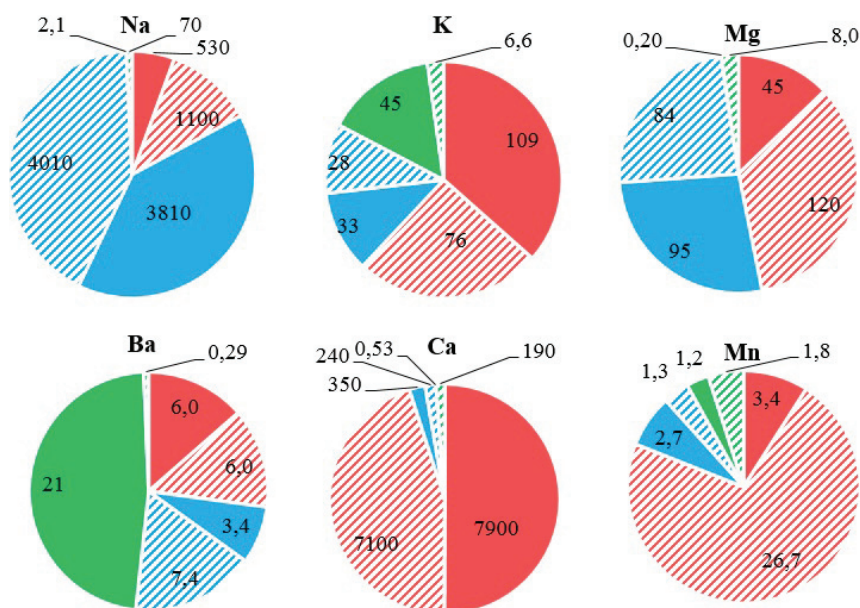
Для того чтобы установить, как концентрация парамагнитных включений влияет на  $T_2$ , рассмотрим образцы (в табл. 2 выделены курсивом) техногенной (№ 10), пластовой (№ 11) и конденсационной (№ 13) вод, а также образцы с их содержанием в пробе более 90 % (рис. 2).



**Рис. 2.** Спектры по временам поперечной релаксации для проб жидкостей с содержанием техногенной (—), пластовой (—) и конденсационной (—) вод 100 % (сплошные линии) и более 90 % (пунктирные линии)

**Fig. 2.** Spectra of the transverse relaxation times for fluid samples with the content of technogenous (—), formation (—) and condensate (—) water equal 100 % (solid line) and more than 90 % (dashed line)

Как видно из рис. 2, ЯМР-спектр пробы 19 с содержанием техногенной воды 91 % смещены влево относительно ЯМР-спектра пробы 10 со 100 % содержанием техногенной воды. Для проб 4 и 13 с



**Рис. 3.** Распределение содержания ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  для проб жидкостей с содержанием техногенной (■), пластовой (▨) и конденсационной (▩) вод 100 % (сплошной цвет) и более 90 % (штриховка)

**Fig. 3.** Distribution of content of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$  ions for fluid samples with the content of the technogenous (■), formation (▨) and condensate (▩) water equal 100 % (solid line) and more than 90 % (dashed line)

содержанием пластовой воды 98 и 100 % характерно такое же поведение ЯМР-спектров. При этом для пластовых вод наблюдаем смещение ЯМР-спектра пробы 15 с содержанием конденсационной воды 92 % вправо относительно ЯМР-спектра пробы 13 со 100 % содержанием конденсационной воды. Эти изменения связаны с изменением концентраций парамагнитных ионов (рис. 3).

На рис. 3. видно, что в пробе 19 (91 % техногенной воды) по сравнению с пробой 10 (100 % техногенной воды) увеличились концентрации ионов  $\text{Na}^+$  (в 2 раза),  $\text{Mg}^{2+}$  (в 2,7 раза) и  $\text{Mn}^{2+}$  (в 7,9 раз), концентрация ионов  $\text{K}^+$  уменьшилась в 1,4 раза, концентрация ионов  $\text{Ba}^{2+}$  не изменилась, ионов  $\text{Ca}^{2+}$  изменились незначительно. Существенное увеличение концентрации ионов с наибольшей магнитной восприимчивостью  $\chi$  (табл. 3) и объясняет уменьшение  $T_2$  пробы 19 относительно пробы 10 в 7 раз, несмотря на содержание в пробе 19 9 % пластовой воды.

В пробе 15 (92 % пластовой воды) по сравнению с пробой 11 (100 % пластовой воды) увеличилась концентрация только ионов  $\text{Ba}^{2+}$  (в 2,2 раза), уменьшились концентрации ионов  $\text{K}^+$  (в 1,2 раза),  $\text{Ca}^{2+}$  (в 1,5 раза) и  $\text{Mn}^{2+}$  (в 2,1 раз), концентрации ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  изменились незначительно. Поскольку увеличилась концентрация только ионов  $\text{Ba}^{2+}$  с  $\chi=+0,91$ , но при этом стало значительно меньше ионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  с более высокими значениями  $\chi$  (табл. 3),  $T_2$  пробы 15 увеличилось в 3,7 раз относительно пробы 11, несмотря на содержание в пробе 15 3 % конденсационной воды с большими  $T_2$ .

Для конденсационной воды характерны следующие изменения концентраций парамагнитных ионов. В пробе 4 (98 % конденсационной воды) по

сравнению с пробой 13 (100 % конденсационной воды) увеличились концентрации ионов  $\text{Na}^+$  (в 33 раза),  $\text{Mg}^{2+}$  (в 40 раз),  $\text{Ca}^{2+}$  (в 358 раз) и  $\text{Mn}^{2+}$  (в 1,5 раза), уменьшились концентрации ионов  $\text{K}^+$  (в 6,8 раза) и  $\text{Ba}^{2+}$  (в 72 раза). Уменьшение  $T_2$  в 3,2 раза пробы 4 относительно пробы 13 объясняется значительным увеличением концентраций парамагнитных ионов с наибольшими значениями  $\chi$  (табл. 3) по сравнению с уменьшением концентраций ионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Ba}^{2+}$ , которые не оказывают существенного влияния на изменение  $T_2$ .

При рассмотрении других процентных соотношений техногенной, пластовой и конденсационной вод закономерность изменения  $T_2$  сохраняется. Увеличение концентрации парамагнитных ионов приводит к уменьшению  $T_2$ , уменьшение концентрации – к увеличению. Для оценки смещения  $T_2$ , соответствующих максимуму спектров, необходимо учитывать значения магнитной восприимчивости каждого элемента.

### Выводы

С использованием данных лабораторного гидрохимического анализа о ионно-солевом и микрокомпонентном составе жидкостей, выносимых из скважин, на основе проведенных ЯМР-исследований экспериментально подтверждено, что время поперечной релаксации существенно зависит от изменения концентрации парамагнитных ионов металлов. Установлена зависимость времени поперечной релаксации от содержания ионов кальция и натрия, по которым выделяют техногенную и пластовую воды по результатам гидрохимического анализа. Это составляет основу для оперативной типизации по ЯМР-данным жидкости, выносимой

из скважин, и позволяет однозначно выделять техногенную воду, характеризующуюся повышенным содержанием ионов кальция, магния, марганца и железа. Тем не менее, исследованные в работе пластовые и конденсационные воды имеют близкие значения времени поперечной релаксации, так как в их составе основное отличие в повышенных концентрациях ионов хлора и натрия, которые незначительно влияют на ЯМР-характеристики. При наличии двух этих типов воды в одной пробе

их разделение становится неоднозначным при содержании одной из них менее 90 %, что связано с перекрытием их ЯМР-спектров.

Дальнейшие ЯМР-исследования пластовых жидкостей связаны с изучением модельных образцов с известными соотношениями техногенной, пластовой и конденсационной вод на предмет определения влияния каждого типа на ЯМР-сигнал и установления детальных связей релаксационных характеристик и гидрохимического состава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксельрод С.М. Ядерный магнитный резонанс в нефтегазовой геологии и геофизике. – М.: Недра, 1990. – 192 с.
2. Эффективность применения метода ядерно-магнитного резонанса при лабораторных петрофизических исследованиях керн и шлама / В.А. Вавилин, А.А. Кунакасов, Т.Р. Галиев, Е.В. Сорокина // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 8. – С. 2–4.
3. Кононенко И.Я., Белорай Я.Л. Эффективность ядерно-магнитных исследований при поисках, разведке и разработке месторождений нефти и газа // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 83–90.
4. Топорков В.Г., Рудаковская С.Ю. Применение метода ЯМР при оценке петрофизических характеристик пород-коллекторов нефти и газа // Нефть. Газ. Инновации. – 2013. – Вып. 171. – № 4. – С. 12–22.
5. Шумскайте М.И., Бобров П.П., Лапина А.С. Изменение диэлектрической проницаемости и ЯМР-сигнала влажных порошков кварцевых гранул при увеличении и уменьшении водонасыщенности // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 5. – С. 15–20.
6. Шумскайте М.И., Глинских В.Н. Зависимость ЯМР-характеристик песчано-алеврито-глинистых образцов от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 10. – С. 1911–1918.
7. Carr H.Y., Purcell E.M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments // Physical review. – 1954. – V. 94. – P. 630–638.
8. Dunn K.J., Bergman D.J., LaTorracca G.A. Nuclear magnetic resonance. Petrophysical and logging application. – London: Pergamon, 2002. – 294 p.
9. Meiboom S., Gill D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times // Review scientific instruments. – 1958. – V. 29. – P. 688–691.
10. Абукова Л.А., Абрамова О.П., Варягова Е.П. Гидрогеохимический мониторинг разработки месторождений углеводородов // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. – 2015. – Вып. 2. – № 12. – С. 1–8.
11. Диэлектрические и радиоизлучательные характеристики пластовых и конденсационных вод из газоносных скважин (предварительные результаты) / М.И. Эпов, С.Н. Меньшиков, А.Н. Харитонов, А.Н. Романов, В.С. Пермяков, С.Б. Бортникова, Н.В. Юркевич // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 7. – С. 1298–1309.
12. Результаты изучения вязкости нефти месторождений республики Татарстан с помощью ЯМР-релаксометрии / Т.А. Зарипов, М.М. Дорогиницкий, Б.И. Гизатуллин, Т.Р. Абдуллин, К.М. Мусин, В.М. Мурзакаев // Каротажник. – 2015. – Вып. 253. – № 7. – С. 3–12.
13. Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтесодержащих пород. – М.: Недра, 2007. – 616 с.
14. Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. – М.: Химия, 2002. – 439 с.
15. Коатес Дж.Р., Хиао Л.Ч., Праммер М.Д. Каротаж ЯМР. Принципы и применение. – Хьюстон: Халлибуртон Энерджи Сервисез, 2001. – 342 с.
16. Wettability saturation and viscosity from NMR measurements / R. Freedman, N. Heaton, M. Flaum, G. Hirasaki, C. Flaum, M. Hurlimann // SPE Journal. – 2003. – V. 8. – P. 317–327.
17. Kleinberg R.L., Vinegar H.J. NMR properties of reservoir fluids // The log analyst. – 1996. – V. 37. – № 6. – P. 20–32.
18. Low-field NMR determinations of the properties of heavy oils and water-in-oil emulsions / G.A. LaTorracca, K.J. Dunn, P.R. Webber, R.M. Carlsons // Magnetic Resonance Imaging. – 1998. – V. 16. – P. 659–662.
19. Shkalikov N.V., Skirda V.D., Archipov R.V. Solid-like component in the spin-spin NMR-relaxation of heavy oils // Magnetic resonance in solid. – 2006. – V. 8. – № 1. – P. 38–42.
20. Tayler M.C., Levitt M.H. Paramagnetic relaxation of nuclear singlet states // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2011. – № 13. – P. 9128–9130.

Поступила 23.01.2017 г.

#### Информация об авторах

**Шумскайте М.И.**, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Глинских В.Н.**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией скважинной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геофизик Новосибирского государственного университета.

**Бортникова С.Б.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией геоэлектродхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Харитонов А.Н.**, кандидат технических наук, заместитель директора центра по контролю за разработкой месторождений ООО «Газпромдобыча Надым».

**Пермяков В.С.**, начальник лаборатории контроля показателей разработки месторождений службы разработки месторождений и геолого-разведочных работ ООО «Газпромдобыча Надым».



UDK 550.8.055:550.845

## NMR-RELAXOMETRY LABORATORY STUDY OF FLUIDS TAKEN FROM BOREHOLES

**Mariya Y. Shumskayte**<sup>1</sup>,

ShumskayteMI@ipgg.sbras.ru

**Vyacheslav N. Glinskikh**<sup>1,2</sup>,

GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

**Svetlana B. Bortnikova**<sup>1</sup>,

BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

**Andrey N. Kharitonov**<sup>3</sup>,

Andrey@nadym-dobycha.gazprom.ru

**Viktor S. Permyakov**<sup>3</sup>,

Permyakov.VS@nadym-dobycha.gazprom.ru

<sup>1</sup> A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
3, Koptug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

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

<sup>3</sup> Gaspromdobycha Nadym,  
14, Pionerskaya street, Nadym, 629730, Russia.

**The relevance.** Timely diagnostics of the fluid, taken from a borehole, allows determining the rise of flooding and destruction of the bottom-hole zone at the initial stage of well operation. Now diagnostics of a liquid phase is carried out by means of hydrochemical analysis of water samples in laboratory conditions. This method provides meaningful data on ionic-salt and microcomponent composition of the studied liquid. Diagnostics operativeness is very important in the most of cases, that is why it is necessary to find alternative methods and approaches for reservoir fluids express studying. This method is NMR-relaxometry. It allows typifying effectively the fluid taken from a borehole in combination with the hydrochemical data.

**The aim of the research** is to develop the NMR-relaxometry method as applied to diagnostics of the fluid taken from a borehole, based on the dependence of transverse relaxation time on concentration of paramagnetic ions.

**The methods used:** expanded hydrochemical analysis including the determination of ion-salt and microcomponent composition and laboratory methods of pulsed NMR-relaxometry aimed at determining transverse relaxation time.

**The results.** Using the laboratory hydrochemical analysis data on ionic-salt and microcomponent composition of the fluid taken from a borehole and based on the conducted NMR-investigations, the authors have experimentally confirmed the considerable dependence of transverse relaxation time on change in concentration of paramagnetic metal ions. The authors determined the dependence of the transverse relaxation time on the content of calcium and sodium ions. The latter provide a basis for distinguishing technogeneuous and formation water, subsequent to the results of hydrochemical analysis, which is the basis for prompt typification of the fluid taken from a borehole by NMR-data. This dependence allows distinguishing exactly the technogeneuous water characterizing by high content of metal paramagnetic ions.

### Key words:

Nuclear magnetic resonance, relaxation characteristics, reservoir fluid, physicochemical properties, hydrochemical analysis.

### REFERENCES

1. Akselrod S.M. *Yaderny magnitnyy rezonans v neftegazovoy geologii i geofizike* [Nuclear magnetic resonance in petroleum geology and geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 192 p.
2. Vavilin V.A., Kunakasov A.A., Galiev T.R., Sorokina E.V. Efficiency of application of nuclear-magnetic resonance methods in laboratory petrophysical investigations of core sample and mud. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2011, no. 8, pp. 2–4. In Rus.
3. Kononenko I.Ya., Beloray Ya.L. Efficiency of nuclear magnetic investigations in prospecting, exploration and development of oil and gas fields. *Geoinformatika*, 2006, no. 3, pp. 83–90. In Rus.
4. Toporkov V.G., Rudakovskaya S.Yu. NMR method application when estimating petrophysical characteristics of reservoir rocks of oil and gas. *Neft. Gaz. Innovatsii*, 2013, vol. 171, no. 4, pp. 12–22. In Rus.
5. Shumskayte M.J., Bobrov P.P., Lapina A.S. Change of dielectric permittivity and NMR signal of quartz granules powders at imbibition and drying. *Geology, geophysics and development of oil and gas field*, 2016, no. 5, pp. 15–20. In Rus.
6. Shumskayte M.J., Glinskikh V.N. Relation of NMR parameters with specific surface and resistivity of shaly sandstone and siltstone samples: experimental study. *Russian Geology and geophysics*, 2016, vol. 57, no. 10, pp. 1911–1918. In Rus.
7. Carr H.Y., Purcell E.M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments. *Physical review*, 1954, vol. 94, pp. 630–638.
8. Dunn K.J., Bergman D.J., LaTorracca G.A. *Nuclear magnetic resonance. Petrophysical and logging application*. London, Pergamon, 2002. 294 p.
9. Meiboom S., Gill D. Modifies spin-echo method for measuring nuclear relaxation times. *Review scientific instruments*, 1958, vol. 29, pp. 688–691.
10. Abukova L.A., Abramova O.P., Varyagova E.P. Hydrochemical monitoring of hydrocarbon fields development. *Georesursy. Geoenergetika. Geopolitika*, 2012, vol. 2, no. 12, pp. 1–8. In Rus.

11. Epov M.I., Menshikov S.N., Kharitonov A.N., Romanov A.N., Permyakov V.S., Bortnikova S.B., Yurkevich N.V. Dielectric and radio-emitting characteristics of formation and condensation water from gas-bearing wells (preliminary results). *Russian Geology and geophysics*, 2017, vol. 58, no. 7, pp. 1298–1309. In Rus.
12. Zaripov T.A., Doroginitskiy M.M., Gizatullin B.I., Abdullin T.R., Musin K.M., Murzakaev V.M. Results of study of oil viscosity in the fields of the Tatarstan Republic by NMR relaxometry. *Karotazhnik*, 2015, vol. 253, no. 7, pp. 3–12. In Rus.
13. Gudok N.S., Bogdanovich N.N., Martynov V.G. *Opreделение fizicheskikh svoystv neftesoderzhashchikh porod* [Determination of physical properties of oil containing rocks]. Moscow, Nedra Publ., 2007. 616 p.
14. Dzhafarov I.S., Syngaevskiy P.E., Khafizov S.F. *Primenenie metoda yadernogo magnitnogo rezonansa dlya kharakteristiki sostava i raspredeleniya plastovykh flyuidov* [Application of the nuclear magnetic resonance method for reservoir fluid composition and distribution characteristic]. Moscow, Khimiya Publ., 2002. 439 p.
15. Koates D. R., Hiao L.Ch., Prammer M.D. *Karotazh YaMR. Printsipy i primeneniye* [NMR logging. Principle and application]. Hyuston, Halliburton Energy Services, 2001. 342 p.
16. Freedman R., Heaton N., Flaum M., Hirasaki G., Flaum C., Hurlimann M. Wettability saturation and viscosity from NMR measurements. *SPE Journal*, 2003, vol. 8, pp. 317–327.
17. Kleinberg R.L., Vinegar H.J. NMR properties of reservoir fluids. *The log analyst*, 1996, vol. 37, no. 6, pp. 20–32.
18. LaTorraca G.A., Dunn K.J., Webber P.R., Carlsons R.M. Low-field NMR determinations of the properties of heavy oils and water-in-oil emulsions. *Magnetic Resonance Imaging*, 1998, vol. 16, pp. 659–662.
19. Shkalikov N.V., Skirda V.D., Archipov R.V. Solid-like component in the spin-spin NMR-relaxation of heavy oils. *Magnetic resonance in solid*, 2006, vol. 1, no. 8, pp. 38–42.
20. Tayler M.C., Levitt M.H. Paramagnetic relaxation of nuclear singlet states. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2011, no. 13, pp. 9128–9130.

Received: 23 January 2017.

#### Information about the authors

**Mariya Y. Shumskayte**, junior researcher, A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Vyacheslav N. Glinskikh**, Dr. Sc., associate professor, head of the laboratory, A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; assistant professor of the department of Geophysics at the Novosibirsk State University.

**Svetlana B. Bortnikova**, Dr. Sc., professor, head of the laboratory, A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Andrey N. Kharitonov**, Cand. Sc., deputy director, Gaspromdobycha Nadym.

**Viktor S. Permyakov**, head of the laboratory, Gaspromdobycha Nadym.

УДК 62–868:532.542.001.24

## РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАТОПЛЕННОГО ВИБРИРУЮЩЕГО КОНFUЗОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРАТОРА

Азин Антон Владимирович<sup>1</sup>,  
antonazin@niipmm.tsu.ru

Богданов Евгений Петрович<sup>2</sup>,  
epbogdanov@mail.ru

Пономарев Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
psv@niipmm.tsu.ru

Рикконен Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
rikk2@yandex.ru

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

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания энергоэффективного вибрационного оборудования для подготовки нефти к транспорту. Вибрационные технологии могут существенно повысить производительность нефтяного оборудования при процессах обессоливания, обезвоживания, снижения вязкости и гистерезисного нагрева нефти. Энергоэффективность применения вибрационной обработки заключается в том, что исключается применение энергозатратных термических методов обработки нефти. В технике не существует теоретических и инженерных методик расчета вибрирующего затопленного конфузора в сплошной жидкой среде. Затопленный в сплошной среде вибрирующий конфузор представляет собой нелинейную колебательную систему, и расчет таких систем вызывает определенную трудность. Проектирование такого вибрационного оборудования связано с созданием оригинальной методики определения гидравлических сопротивлений затопленного вибрирующего конфузора, находящегося вблизи неподвижной поверхности. Методика предназначена для инженеров-разработчиков нефтяного оборудования.

**Цель работы:** создание методики расчета гидравлических сопротивлений в условиях струеобразования жидкости вибрирующего конфузора. Определение сил сопротивления движению затопленного конфузора в условиях переменных геометрических размеров гидравлической системы. Конфузор работает в неньютоновской жидкости.

**Методы исследования.** Основным методом исследования является математическое моделирование нелинейной колебательной системы затопленного вибрирующего конфузора при переменных геометрических размерах гидравлической системы.

**Результаты.** Предложен инженерный метод определения гидравлических сопротивлений затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора и гидравлической силы образования затопленной струи в неподвижной среде. Произведен расчет сил гидравлических сопротивлений подвижного и неподвижного конфузоров электромагнитного вибратора. Проведен анализ сил сопротивления трения, лобовых сопротивлений и местных гидравлических сопротивлений конфузора электромагнитного вибратора.

### Ключевые слова:

Конфузор, диффузор, жидкость, вибрация, сила.

### Введение

Задача о возвратно-поступательном движении конфузора в жидких сплошных технологических средах представляет значительный научный и практический интерес.

Электромагнитные вибраторы, основанные на принципе возвратно-поступательного движения конфузора с созданием затопленных струй, предназначены для эффективного повышения текучести вязких жидкостей, в основном нефти и нефтепродуктов [1–3]. Создание затопленных струй с высокими сдвиговыми скоростями приводит к качественному перемешиванию, высокой степени диспергации, что значительно сокращает длительность технологических процессов. В ряде случаев такие устройства создают совершенно новые потребительские свойства нефти и нефтепродуктов [1–5].

В технике не существует методик расчета и проектирования вибрирующего затопленного конфузора.

Целью настоящей работы является создание методики расчета гидравлических сопротивлений в условиях струеобразования жидкости вибрирующего конфузора, определения силы сопротивления движению конфузора с предоставлением рекомендаций для конструирования активных элементов названных устройств, работающих в ньютоновских жидкостях.

### Постановка задачи

При формировании затопленной струи жидкость вытекает из сопла параллельными струйками и с большой скоростью входит в массу неподвижной жидкости [6–9]. При этом струя претер-

певают существенные изменения – принимает коническую форму, постепенно затормаживается и отдаёт энергию в пограничный турбулентный слой [10–12]. Схематично этот процесс представлен на рис. 1.

Для круглого сечения струи точка 0 является вершиной конуса, определяющего форму струи, и называется полюсом,  $\alpha$  – угол конусности струи, который зависит от формы конфузора (сопла).

Для любого сечения струи:

$$d = d_c + 2L \tan \alpha = d_c + kL,$$

где  $d$  – диаметр струи на расстоянии  $L$  от выходного отверстия конфузора;  $d_c$  – выходной диаметр сопла;  $k$  – коэффициент растекания струи,  $k=2\tan\alpha$ .

Сила динамического воздействия струи на неподвижную жидкость характеризуется длиной участка ядра постоянных скоростей (ядра струи)  $L_H$ . С увеличением этой длины возрастает проникающая и деструкционная способности струи и, как следствие, увеличивается производительность устройства.

Как следует из рис. 1, длина  $L_H$  увеличивается с уменьшением коэффициента  $k$ . Экспериментальные исследования показали, что величина  $k$  зависит от типа сопла, его относительной длины  $L_c/d_c$  и формы входных кромок, где  $L_c$  – толщина конфузора.

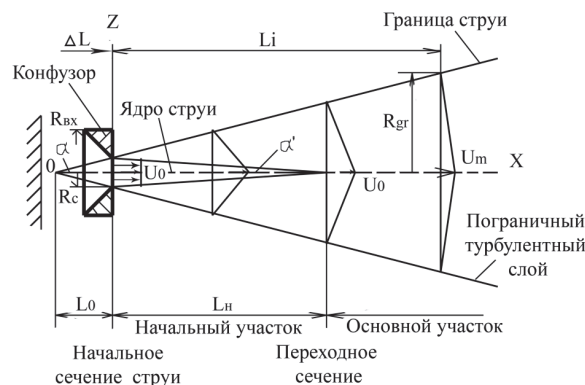


Рис. 1. Схема истечения жидкости из вибрирующего конфузора

Fig. 1. Scheme of liquid outflow from the vibrating confuser

Полюс струи расположен на расстоянии  $L_0$  от начального сечения струи:

$$L_0 = 0,29 \frac{d_c}{2a},$$

где  $a$  – коэффициент структуры струи, который зависит от различных условий: плотности и вязкости жидкости; конструкции конфузора и т. д. [5]. Для конкретной конструкции и технологической жидкости коэффициент  $a$  определяется экспериментально.

Длина ядра струи:

$$L_H = 0,67 \frac{d_c}{2a}.$$

Тангенс угла, равного половине угла расширения струи:

$$\tan \alpha = 3,4a.$$

Половина высоты струи на расстоянии  $L_i$  от начального сечения струи:

$$R_{gr} = 3,4aL_i + \frac{d_c}{2}.$$

Скорость на оси основного участка струи:

$$U_m = 0,96U_0 \frac{d_c}{2aL_i + 0,29}.$$

Конфузор колеблется в пространстве по синусоидальному закону:

$$X_i = X_m \sin \omega t,$$

где  $X_m$  – максимальное значение смещения конфузора,  $m$ ;  $\omega$  – угловая частота колебаний конфузора,  $rad/s$  [3, 4].

В электромагнитном вибраторе затопленный конфузор представляет собой подпружиненный якорь электромагнита (рис. 2).

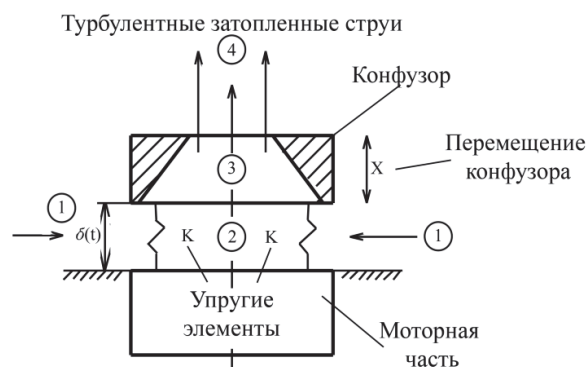


Рис. 2. Схема работы конфузора электромагнитного вибратора

Fig. 2. Scheme of operation of the confuser of electromagnetic vibrator

При подаче на электромагнит моторной части импульсного напряжения по обмотке электромагнита протекает электрический ток, который создает тяговое усилие, и якорь электромагнита (активатор) притягивается к моторной части. Активатор начинает двигаться в сторону уменьшения воздушного зазора  $\delta(t)$  (рис. 2). Активатор совершает возвратно-поступательные движения, и за счет разности гидравлических сопротивлений через сопло начинает протекать жидкость [1–3].

Для определения сил сопротивления от трения и сил сопротивления от местных гидравлических сопротивлений целесообразно конструкцию активатора разделить на элементарные зоны (рис. 2, 3), сопротивления в которых описываются известными формулами [10, 13].

Жидкость последовательно протекает через четыре конструктивные зоны: 1 – зона, характеризующая объём и скорость жидкости перед всасыванием её в зазор; 2 – зона движения жидкости в зазоре вибратора; 3 – зона движения жидкости в конфузоре; 4 – зона движения жидкости, выходящей из сопла в окружающую среду [9]. Для простоты понимания схему вибрирующего активатора

(рис. 2) необходимо заменить на статическую схему, в которой конфузор неподвижен, а жидкость меняет направление течения (рис. 3). По этой схеме наглядно можно определить местные гидравлические потери конструкции и потери на трение при изменении зазора электромагнита. Потери на трение пропорциональны вязкости, местные гидравлические сопротивления зависят от конструкции конфузора (элемент резкого сужения, элемент резкого расширения, элемент плавного сужения). В этой схеме только один элемент является переменной величиной – площадь сечения входа в зазор  $S_{ZAZ}(\delta)$ .

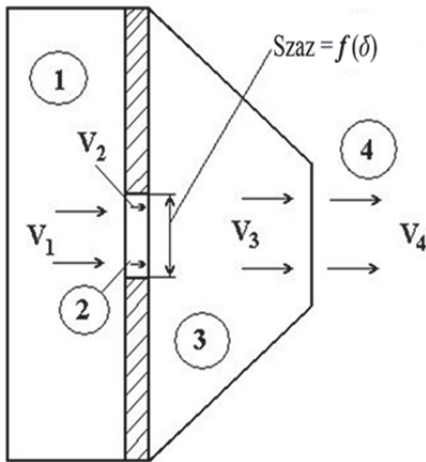


Рис. 3. Схема конструкции активатора для определения местных гидравлических потерь

Fig. 3. Design scheme of an activator for determining local hydraulic losses

Движению активатора препятствует сила гидравлического сопротивления, в которую, кроме сил сопротивления на трение и местные сопротивления, входит лобовое сопротивление [14–16].

Суммарная сила гидравлического сопротивления для прямого хода якоря (течение жидкости слева направо, конфузор притягивается к электромагниту – движется справа налево, рис. 3) состоит из следующих составляющих:

- сила вязкого трения в зазоре

$$F_{ZAZ}(\delta) = \eta \frac{S_{pl}}{\delta(t)} V_{\delta} = \eta \frac{S_{pl}}{\delta(t)} \frac{S_{vch}}{S_{ZAZ}(\delta)};$$

- сила вязкого трения в конфузоре

$$F_{SOP} = \eta S_{SOP} \frac{V_{ak}}{d_{SOP}};$$

- сила лобового сопротивления конфузора

$$F_{lob} = C1 S_{aktiv} \frac{\rho}{2} V_{ak}^2;$$

- сила местного гидравлического сопротивления резкого сужения (переход из зоны 1 в зону 2)

$$F_{s1-2}(\delta) = \zeta_{1-2} \frac{\rho}{2} S_{ZAZ}(\delta) V_{\delta}^2 = \zeta_{1-2} \frac{\rho}{2} S_{ZAZ}(\delta) \frac{S_{vch}}{S_{ZAZ}(\delta)} V_{ak}^2;$$

- сила местного гидравлического сопротивления резкого расширения (из зоны 2 в зону 3)

$$F_{r2-3}(\delta) = \zeta_{2-3}(\delta) \frac{\rho}{2} S_{vch} V_{ak}^2;$$

- сила местного гидравлического сопротивления в конфузоре (медленное сужение в зоне 3)

$$F_{k3} = \zeta_3 \frac{\rho}{2} S_{SOP} V_{SOP}^2 = \zeta_3 \frac{\rho}{2} S_{SOP} \frac{S_{vch}}{S_{SOP}} V_{ak}^2;$$

- сила местного гидравлического сопротивления внезапного расширения из зоны 3 в зону 4 (площадь в зоне 4 в три раза больше площади зоны 3)

$$F_{r3-4} = \zeta_{3-4} \frac{\rho}{2} 3 S_{SOP} \left( \frac{S_{vch}}{S_{SOP}} \right)^2 V_{ak}^2;$$

- коэффициенты местных гидравлических сопротивлений [4, 5]

$$\zeta_{1-2} = 0,45; \zeta_{2-3}(\delta) = \left( \frac{S_{vch}}{S_{ZAZ}(\delta) - 1} \right)^2;$$

$$\zeta_3 = 0,84; \zeta_{3-4} = \left( \frac{3 S_{SOP}}{S_{SOP} - 1} \right)^2.$$

В формулах используются следующие параметры:  $\delta(t)$  – зазор между активатором и моторной частью,  $m$ ;  $V_{\delta}$  – скорость жидкости в зазоре,  $m/s$ ;  $V_{ak}$  – скорость конфузора,  $m/s$ ;  $\eta$  – динамическая вязкость,  $Pa \cdot s$ ;  $\rho$  – плотность жидкости,  $kg/m^3$ ;  $S_{pl}$  – площадь активатора в зазоре,  $m^2$ ;  $S_{vch}$  – входная площадь сопла,  $m^2$ ;  $S_{ZAZ}(\delta)$  – площадь входа в зазор,  $m^2$ ;  $d_{SOP}$  – диаметр входа в сопло,  $m$ ;  $S_{SOP}$  – площадь сопла,  $m^2$ ;  $C1$  – коэффициент лобового сопротивления прямого хода активатора,  $C1=1,1$ ;  $C2$  – коэффициент лобового сопротивления обратного хода активатора,  $C2=0,3$ ;  $S_{aktiv}$  – площадь конфузора,  $m^2$  [17–19].

Суммарная сила гидравлического сопротивления движению прямого хода конфузора (жидкость течет слева направо) складывается из суммы сопротивлений:

$$F_{C1}(\delta) = F_{ZAZ}(\delta) + F_{SOP} + F_{lob} + F_{r1-2}(\delta) + F_{r2-3}(\delta) + F_{k3} + F_{r3-4}.$$

Сила гидравлического сопротивления конструкции при разных зазорах  $\delta_i$  (вязкость и плотность соответствуют воде):

$$d_{SOP} = 24 \cdot 10^{-3} m; S_{vch} = 3 \cdot 10^{-3} m^2; S_{SOP} = 0,453 \cdot 10^{-3} m^2; S_{pl} = 3,923 \cdot 10^{-3} m^2;$$

$$S_{aktiv} = 5,73 \cdot 10^{-3} m^2; S_{ZAZ}(\delta) = L_{okr} \cdot \delta_i;$$

$$L_{okr} = 565 \cdot 10^{-3} m; \eta = 10^{-3} Pa \cdot s; \rho = 1000 \frac{kg}{m^3}.$$

Конфузор имеет положение покоя на расстоянии  $5 \text{ mm}$  от стенки электромагнита, и поэтому при минимальных зазорах  $\delta_i$  имеет максимальную величину виброскорости [1, 4–6].

Среднее значение вибро смещения конфузора на частоте колебаний  $50 \text{ Hz}$  составляет  $5 \text{ mm}$ , что

при скорости  $V_{ak}$  составляет  $1,57 \text{ m/s}$ . В статической схеме принимается скорость жидкости равной  $1,57 \text{ m/s}$ .

По расчетным данным видно, что для жидкостей, близких по вязкости и плотности к воде, основное сопротивление движению активатора при прямом ходе оказывают местные гидравлические сопротивления – сопротивление резкого расширения и резкого сужения (рис. 3). Эти силы сопротивления резко возрастают при уменьшении зазора, особенно существенно возрастает сила резкого расширения [20, 21].

Сила лобового сопротивления увеличивается с уменьшением зазора из-за того, что уменьшение зазора в вибраторе сопровождается увеличением скорости конфузора  $V_{ak}$  в квадрате. Но это увеличение существенно ниже увеличения сил сопротивления от местных потерь.

Силы трения в зазоре резко увеличиваются только при малых зазорах, но они тоже невелики (рис. 4).

Зависимость суммарной силы сопротивления резко возрастает (в десятки раз) с уменьшением зазора (рис. 6). Основной вклад в суммарную силу имеют силы резкого расширения  $F_{r2-3}$ ,  $F_{r3-4}$ .

#### Численные результаты

Гидравлические сопротивления движению активатора при обратном ходе (жидкость течет справа налево):

- сила лобового сопротивления конфузора:

$$F_{lob2} = C2S_{aktiv} \frac{\rho}{2} V_{ak}^2.$$

- сила местного гидравлического сопротивления резкого сужения (переход из зоны 4 в зону 3):

$$F_{S4-3}(\delta) = \zeta_{4-3} \frac{\rho}{2} S_{SOP} V_{\delta}^2 = \zeta_{4-3} \frac{\rho}{2} S_{SOP} \left( \frac{S_{vch}}{S_{SOP}} \right)^2 V_{ak}^2.$$

- сила местного гидравлического сопротивления постепенного расширения (течение жидкости в конфузоре справа налево):

$$F_{r3} = \zeta_3 \frac{\rho}{2} S_{SOP} \left( \frac{S_{vch}}{S_{SOP}} \right)^2 V_{ak}^2;$$

- сила местного гидравлического сопротивления резкого сужения (переход из зоны 3 в зону 2):

$$F_{S3-2}(\delta) = \zeta_{3-2} \frac{\rho}{2} S_{ZAZ}(\delta) V_{\delta}^2 = \zeta_{3-2} \frac{\rho}{2} S_{ZAZ}(\delta) \left( \frac{S_{vch}}{S_{ZAZ}(\delta)} \right)^2 V_{ak}^2;$$

- сила местного гидравлического сопротивления резкого расширения (из зоны 2 в зону 1):

$$F_{r2-1} = \zeta_{2-1}(\delta) 3 \frac{\rho}{2} S_{ZAZ}(\delta) \left( \frac{S_{vch}}{S_{ZAZ}} \right)^2 V_{ak}^2;$$

- сила вязкого трения в конфузоре:

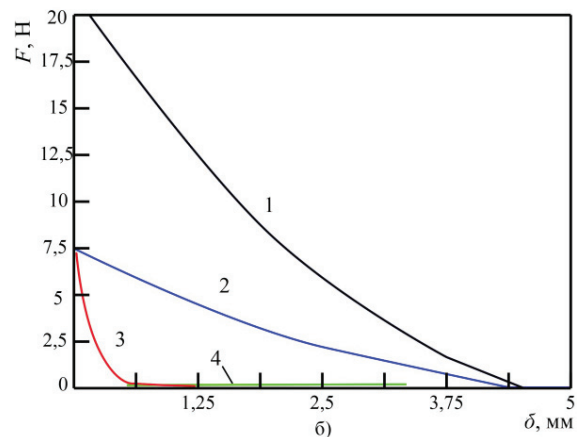
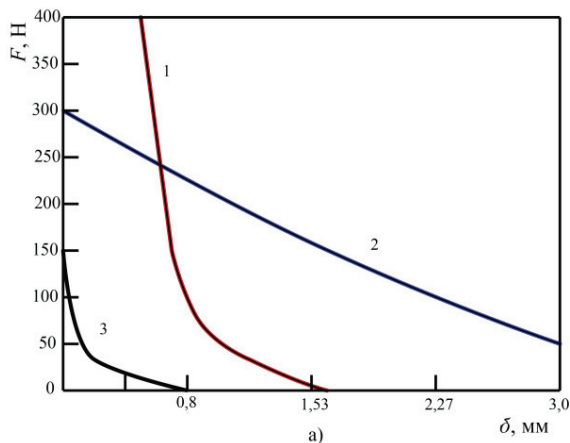
$$F_{SOP} = \eta S_{SOP} \frac{V_{ak}}{d_{SOP}};$$

- сила вязкого трения в зазоре:

$$F_{ZAZ}(\delta) = \eta \frac{S_{P1}}{\delta(t)} V_{\delta} = \eta \frac{S_{vch}}{S_{ZAZ}} V_{ak};$$

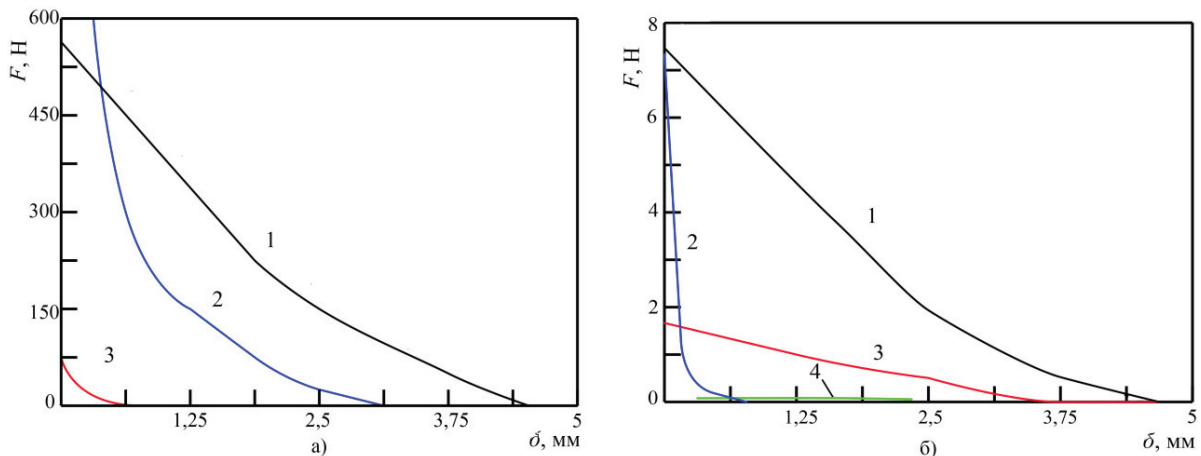
$$\zeta_{4-3} = 0,3; \quad \zeta_3 = k \left( \frac{S_{vch}}{S_{SOP}} - 1 \right)^2 = 0,71 \left( \frac{S_{vch}}{S_{SOP}} - 1 \right)^2;$$

$$\zeta_{3-2} = 0,3; \quad \zeta_{2-1}(\delta) = \left( \frac{S_{ZAZ}(\delta)}{S_{SOP}} - 1 \right)^2.$$



**Рис. 4.** Сила трения в зазоре при малых зазорах. Зависимость сил сопротивления от изменения зазора  $\delta(t)$  за счет: а) местных гидравлических сопротивлений (течение жидкости слева направо): 1, 2 – силы сопротивления резкого расширения; 3 – сила сопротивления резкого сужения; б) сил трения и лобового сопротивления: 1 – сила местного гидравлического сопротивления в конфузоре; 2 – сила лобового сопротивления; 3 – сила трения в зазоре; 4 – сила трения в сопле

**Fig. 4.** Friction force in the gap at small gaps. Dependence of the resistance forces on the change of the gap  $\delta(t)$  due to the: а) local hydraulic resistances (fluid flow from left to right): 1, 2 are the resistance forces of the dramatic expansion; 3 is the force of resistance of an intake; б) friction forces and drag: 1 is the force of the drag in the confuser; 2 is the drag force; 3 is the friction in the gap; 4 is the friction force in the confuser



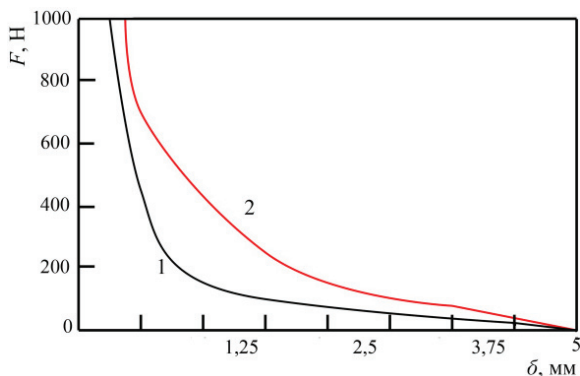
**Рис. 5.** Зависимости сил гидравлических сопротивлений при обратном ходе. а) Зависимость сил сопротивления от изменения зазора  $\delta(t)$ : 1 – сила гидравлического сопротивления постепенного расширения (конфузор); 2 – сила гидравлического сопротивления резкого расширения из зоны 2 в зону 1; 3 – сила гидравлического сопротивления резкого сужения; б) Зависимость сил сопротивления от изменения зазора  $\delta(t)$ : 1 – сила гидравлического сопротивления в зазоре; 2 – сила лобового сопротивления; 3 – сила гидравлического сопротивления резкого сужения из зоны 4 в зону 3; 4 – сила трения в конфузоре

**Fig. 5.** Dependence of forces of hydraulic resistances on the reverse motion. а) Dependence of the resistance forces from the change of the gap  $\delta(t)$ : 1 is the resistance force of the gradual expansion; 2 is the resistance forces of the dramatic expansion from zone 2 to zone 1; 3 is the force of resistance of an intake; б) Dependence of the resistance forces from the change of the gap  $\delta(t)$ : 1 is the force of drag in gap; 2 is the drag force; 3 is the force of resistance of an intake from zone 4 to zone 3; 4 is the friction force in the confuser

Зависимости сил гидравлических сопротивлений при обратном ходе конфузора представлены на рис. 5.

Суммарная сила гидравлического сопротивления движению обратного хода активатора складывается из суммы сопротивлений:

$$F_{C2}(\delta) = F_{ZAZ}(\delta) + F_{SOP} + F_{r2-1} + F_{S3-2} + F_{r3} + F_{S4-3}(\delta) + F_{lob2}.$$



**Рис. 6.** Суммарные зависимости гидравлических сопротивлений движению жидкости при движении конфузора. Зависимость суммарной силы сопротивления от изменения зазора  $\delta(t)$ : 1) при течении жидкости слева направо; 2) при течении жидкости справа налево. Плотность  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ , вязкость  $\eta=10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

**Fig. 6.** Total dependences of hydraulic resistances to fluid flow at the confuser movement. Dependence of total resistance force from the change of the gap  $\delta(t)$ : 1) fluid flows from left to right; 2) liquid flows from right to left. The density is  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ , the viscosity is  $\eta=10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Разность гидравлических сопротивлений системы при колебаниях конфузора равна силе образования однонаправленного движения жидкости из сопла. Для определения разности сил гидравлических сопротивлений системы строятся суммарные зависимости гидравлических сопротивлений движению жидкости при движении конфузора (рис. 6) [17–22].

#### Выводы

1. В работе представлен анализ гидравлических сопротивлений, которые преодолевает конфузор при работе в жидких сплошных средах. Произведен расчет силы гидравлических сопротивлений неподвижного конфузора. Проведен количественный анализ сил сопротивления трения, лобовых сопротивлений и местных гидравлических сопротивлений для конкретной конструкции конфузора и конкретной жидкости.
2. Более полную картину работы вибрирующего затопленного конфузора можно получить, решая динамическую задачу с учетом всех гидравлических сопротивлений, рассчитанных в данной работе.
3. По расчетным данным видно, что в жидкостях, близких по вязкости и плотности к воде (ньютоновские жидкости), основное сопротивление движению активатора при прямом ходе оказывают местные гидравлические сопротивления – сопротивление резкого расширения и резкого сужения (рис. 4, 5). Эти силы сопротивления резко возрастают при уменьшении зазора, осо-

- бенно существенно возрастает сила резкого расширения.
4. Сила лобового сопротивления растет с уменьшением зазора. Это происходит из-за того, что уменьшение зазора в вибраторе сопровождается увеличением скорости жидкости в конфузоре. Но это увеличение существенно ниже изменения сил сопротивления от местных потерь.
  5. Сила трения в зазоре резко увеличиваются только при малых зазорах, но они тоже невелики.
  6. Зависимость суммарной силы сопротивления резко возрастает (в десятки раз) с уменьшением зазора (рис. 6). Основной вклад в суммарную силу имеет сила резкого расширения канала.
  7. Суммарные силы гидравлических сопротивлений движению жидкости, в зависимости от направления относительно конфузора, будут иметь разные значения. Причем суммарная сила гидравлического сопротивления движению обратного хода активатора  $F_{c2}$  больше суммарной силы гидравлического сопротивления движению прямого хода конфузора  $F_{c1}$  при одинаковых гидравлических зазорах. Эта разница в сопротивлениях создает однонаправленный поток жидкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рикконен С.В., Лоскутова Ю.В. Магнитогидромеханические поля: воздействие на вязкостно-температурные свойства высокопарафинистой нефти // *Oil & Gas Journal Russia*. – 2014. – № 3. – С. 28–31.
2. Rikkonen S., Bogdanov E., Nomokonova Yu. Oscillatory system of the jet electromagnetic vibrator // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2014. – V. 66. – P. 1–4.
3. Ткачев О.А., Тугунов П.И. Сокращение потерь нефти при транспорте и хранении. – М.: Недра, 1988. – 116 с.
4. Экспериментальное и компьютерное моделирование гидродинамического шума потока рабочей среды в проточных частях регулирующих органов гидравлических систем / Э.Г. Берестовицкий, М.А. Ермилов, П.И. Кизилов, А.Н. Крючков // XXVII сессия Российского акустического общества, посвященная памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смольякова и В.И. Попкова. – СПб.: РАО, 2014. – 10 с.
5. Shives M.R. Hydrodynamic modeling, optimization and performance assessment for ducted and non-ducted tidal turbines. URL: [http://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/shives\\_thesis\\_2011.pdf](http://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/shives_thesis_2011.pdf) (дата обращения 01.02.2017).
6. Пассар А.В., Тимошенко Д.В. Численная реализация комплексного метода расчета на примере проточной части турбины турбокомпрессора ТКР911 // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 79–90.
7. Shina P.K., Das A.K., Majumdar B. Numerical Investigation of flow through Annular Diffusing Duct // *International Journal of Engineering & Technology IJET- IJENS*. – 2011. – V. 11. – № 3. – P. 186–196.
8. Мухаметзянова А.Г., Дьяконов Г.С., Кульментьева Е.И. Гидравлические сопротивление турбулентного потока несжимаемой жидкости в осесимметричных каналах переменного сечения с различными формообразующими // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2006. – № 1. – С. 209–216.
9. Gant S., Stallard T. Modelling a tidal turbine in unsteady flow // *Proc. Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. – Vancouver BC, Canada, 2008. – P. 473–479.
10. Cherry E.M. Three-dimensional velocity measurements in annular segments including the effects of upstream strut wake // *International journal of heat and fluid flow*. – 2010. – V. 31. – P. 569–575.
11. Рыженков В.О., Иващенко В.А., Мулладжанов Р.И. Численное моделирование турбулентного течения и теплопереноса в канале методом спектральных элементов: влияние пространственного разрешения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 55–63.
12. Рикконен С.В. Энергетика вязкого течения сплошных сред. Научно-технологическое развитие нефтегазового комплекса // Доклады IV международных научных Надиловских чтений. – Алматы; Томск, 2006. – С. 83–92.
13. Keerthana R., Jamuna R.G. Flow analysis of annular diffusers // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. – 2012. – V. 2. – Iss. 3. – P. 2348–2351.
14. Расчетно-экспериментальное исследование кавитационного обтекания гидрокрыла NASA0015 / А.В. Сентябов, М.В. Тимошевский, К.С. Первунин, А.А. Гаврилов, Д.М. Маркович, А.А. Дектерёв // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 28–43.
15. Numerical Investigations of PGT10 Gas Turbine Exhaust Diffuser Using Hexahedral Dominant Grid / Vaddin Chetan, D.V. Satish, Dr. Prakash S. Kulkarni // *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*. – 2013. – V. 3. – P. 392–400.
16. Karsten R., Swan A., Culina J. Assessment of arrays of in-stream tidal turbines in the bay of fundy. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0189> (дата обращения 14.02.2017).
17. Katepalli R. Sreenivasan. Liquid nitrogen in fluid dynamics: Visualization and velocimetry using frozen particles. *Review of Scientific Instruments*. – 2012. – V. 83. – P. 085101.
18. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines / W. Batten, A. Bahaj, A. Molland, J. Chaplin // *Renewable Energy*. – 2008. – V. 33. – P. 1085–1096.
19. Пургина Д.В., Строкова Л.А., Кузеванов К.И. Моделирование гидрогеологических условий для обоснования противооползневых мероприятий на участке набережной реки Камы в городе Перми // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 116–127.
20. Sagar D., Paul A.R., Jain A. Experimental investigations of flow computational fluid dynamics investigation of turbulent separated flows in axisymmetric diffusers // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. – 2011. – V. 3. – № 2. – P. 104–109.
21. Shives M. Evaluation of discrete blade effects for ducted turbines using an actuator-line CFD method. – Greater Victoria: University of Victoria, – 2011. – 120 p.
22. Prakash R. Experimental Investigations of Flow through Annular Diffuser with and without Struts // *European Journal of Scientific Research*. – 2011. – V. 52. – № 3. – P. 366–384.

Поступила 09.02.2017 г.

Информация об авторах



**Азин А.В.**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Богданов Е.П.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и материалов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Пономарев С.В.**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Рикконен С.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDK 62-868:532.542.001.24

## CALCULATION OF HYDRAULIC RESISTANCES OF A SUBMERGED VIBRATING CONFUSER OF AN ELECTROMAGNETIC VIBRATOR

**Anton V. Azin<sup>1</sup>,**  
antonazin@niipmm.tsu.ru

**Eugene P. Bogdanov<sup>2</sup>,**  
epbogdanov@mail.ru

**Sergey V. Ponomarev<sup>1</sup>,**  
psv@niipmm.tsu.ru

**Sergey V. Rikkonen<sup>1</sup>,**  
rikk2@yandex.ru

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

<sup>2</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 energy-efficient vibrating equipment for oil treatment to transportation. Vibration techniques can significantly improve the performance of the oil equipment in its desalting, dewatering, viscosity reduction and hysteretic heating. Energy efficiency of application of vibrating processing consists in the fact that the use of energy-intensive thermal methods of oil processing is excluded. There are no theoretical and engineering methods of calculation of vibrating submerged cofusers in a continuous liquid medium. The vibrating confuser submerged in a continuous body is a nonlinear oscillatory system; it is difficult to calculate such systems. The construction of such vibrating equipment is associated with the development of original methods for determining hydraulic resistance of submerged vibrating confusers operating close to the fixed surface. The issue is intended for engineers-developers of oil equipment.

**The main aim** of the study is to develop the methods of calculating the hydraulic resistances in conditions of stream forming of fluid in the vibrating confuser; to determine the resistance force to the submerged confuser movement in conditions of variable geometric sizes of hydraulic system. Confuser works in non-Newtonian fluids.

**Research methods.** The main method of investigation is mathematical modeling of a nonlinear vibrating system of submerged vibrating confuser with variable geometrical sizes of the hydraulic system.

**Results.** The authors found out the new engineering method for determining hydraulic resistances of a submerged vibrating confuser of the electromagnetic vibrator and the hydraulic force of initiation of submerged jet in stationary environment. The authors calculated the forces of hydraulic resistances of movable and stationary confusers of electromagnetic vibrator and analyzed the resistance forces of friction, frontal resistances and local hydraulic resistances of the confuser of the electromagnetic vibrator.

### Key words:

Confuser, diffuser, liquid, vibration, force.

### REFERENCES

- Rikkonen S.V., Loskutova Yu.V. Magnitogidromekhanicheskie polya: vozdeystvie na vyzkostno-temperaturnye svoystva vysokoparafinitoy nefiti [Magnetohydrodynamic fields: effect on viscosity-temperature properties of high-paraffin oil]. *Oil & Gas Journal Russia*, 2014, no. 3, pp. 28–31.
- Rikkonen S., Bogdanov E., Nomokonova Yu. Oscillatory system of the jet electromagnetic vibrator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–4.
- Tkachev O.A., Tugunov P.I. *Sokrashchenie poter nefiti pri transporte i khraneni* [Reduction of oil losses at transport and storage]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 116 p.
- Berestovitsky E.G., Ermilov M.A., Kizilov P.I., Kryuchkov A.N. Eksperimentalnoe i kompyuternoe modelirovanie gidrodinamicheskogo shuma potoka rabochey sredy v protochnykh chastyakh reguliruyushchikh organov gidravlicheskih sistem [Experimental and computer modeling of hydrodynamic noise of operating environment flow in the running parts of the regulators of hydraulic systems]. *XXVII sessiya Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva, posvyashchennaya pamyati uchenykh-akustikov FGUP «Krylovskiy gosudarstvenny nauchny tsentr» A.V. Smolyakova i V.I. Popkova* [XXVII session of the Russian acoustic society dedicated to the memory of scientists in acousticians of «Krylov State scientific center» named after A.V. Smolyakov and V.I. Popkov]. St-Petersburg, 2014. pp. 10–14.
- Shives M.R. *Hydrodynamic modeling, optimization and performance assessment for ducted and non-ducted tidal turbines*. Available at: [http://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/shives\\_thesis\\_2011.pdf](http://pics.uvic.ca/sites/default/files/uploads/publications/shives_thesis_2011.pdf) (accessed 1 February 2017).
- Passar A.V., Timoshenko D.V. Numerical implementation of the complex method based on the example of the turbine of the turbocharger TKP911. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 79–90. In Rus.
- Shina P.K., Das A.K., Majumdar B. Numerical Investigation of flow through Annular Diffusing Duct. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 186–196.
- Mukhametzhanova A.G., Dyakonov G.S., Kulmenteva E.I. Gidravlicheskie soprotivleniye turbulentnogo potoka neszhimaemoy zhidkosti v osesimmetrichnykh kanalakh peremennogo secheniya s razlichnymi formoobrazuyushchimi [Hydraulic resistance of turbulent incompressible fluid flows in axisymmetric channels with a variable cross-section with the various forming]. *Vestnik*

- Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2006, no. 1, pp. 209–216.
9. Gant S., Stallard T. Modelling a tidal turbine in unsteady flow. *Proc. 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vancouver BC, 2008, pp. 473–481.
  10. Cherry E.M. Three-dimensional velocity measurements in annular segments including the effects of upstream strut wake. *International journal of heat and fluid flow*, 2010, vol. 31, pp. 569–575.
  11. Ryzhenkov V.O., Ivashchenko V.A., Mullyadzhyanov R.I. Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a channel with the method of spectral elements: the influence of configuration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 55–63. In Rus.
  12. Rikkonen S.V. Energetika vyazkogo techeniya sploshnykh sred. Nauchno-tehnologicheskoe razvitiye neftegazovogo kompleksa [Energy of viscous flow of continuum. Scientific-technological development of oil and gas complex]. *Doklady IV mezhdunarodnykh nauchnykh Nadirovskikh chteny* [Proc. IV<sup>th</sup> Int. Scient. Nadrowski readings]. Almaty; Tomsk, 2006. pp. 83–92.
  13. Keerthana R., Jamuna R.G. Flow analysis of annular diffusers. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2012, vol. 2, Iss. 3, pp. 2348–2351.
  14. Sentyabov A.V., Timoshevsky M.V., Pervunin K.S., Gavrilov A.A., Markovich D.M., Dektrev A.A. Numerical and experimental investigation of cavitation flow of the NACA0015 hydrofoil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no 8, pp. 28–43. In Rus.
  15. Vaddin Chetan, Satish D.V., Dr. Prakash S. Kulkarni. Numerical Investigations of PGT10 Gas Turbine Exhaust Diffuser Using Hexahedral Dominant Grid. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2013, vol. 3, pp. 392–400.
  16. Karsten R., Swan A., Culina J. Assessment of arrays of in-stream tidal turbines in the bay of fundy. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0189> (accessed 14 January 2017).
  17. Katepalli R. Sreenivasan. Liquid nitrogen in fluid dynamics: Visualization and velocimetry using frozen particles. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, p. 085101.
  18. Batten W., Bahaj A., Molland A., Chaplin J. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. *Renewable Energy*, 2008, vol. 33, pp. 1085–1096.
  19. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modelling of hydrogeological conditions for justification of protective measures in the part of the embankment of the Kama river in Perm. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 116–127. In Rus.
  20. Sagar D., Paul A.R., Jain A. Experimental investigations of flow computational fluid dynamics investigation of turbulent separated flows in axisymmetric diffusers. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 104–109.
  21. Shives M. *Evaluation of discrete blade effects for ducted turbines using an actuator-line CFD method*. Greater Victoria, University of Victoria, 2011. 120 p.
  22. Prakash R. Experimental Investigations of Flow through Annular Diffuser with and without Struts. *European Journal of Scientific Research*, 2011, vol. 52, no. 3, pp. 366–384.

*Received: 9 February 2017.*

#### Information about the authors

**Anton V. Azin**, Cand. Sc., scientific associate, National Research Tomsk State University.

**Eugene P. Bogdanov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey V. Ponomarev**, Dr. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

**Sergey V. Rikkonen**, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

УДК 549.514:549.01

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ И ГЕНЕЗИС СФЕРИЧЕСКИХ ЗЁРЕН АКЦЕССОРНОГО ПСЕВДОРУТИЛА В ДЕВОНСКИХ ГРАНИТОИДАХ АЛЕЙСКО-ЗМЕИНОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА (СЗ ЧАСТЬ РУДНОГО АЛТАЯ)

Новоселов Константин Леонидович,  
nkonstantin1@rambler.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования округлых форм микрозёрен (глобулей, сферул, шариков) акцессорного псевдорутила, впервые установленного в полифазном алейско-змеиногорском гранитоидном комплексе ( $D_{2-3}$ ).

**Цель работы:** детально изучить их распространенность, парагенетическую ассоциацию в гранитоидах последовательных фаз, на электронно-микроскопическом уровне исследовать строение глобулей, их химический состав.

**Методы исследования.** Минералогические пробы весом 5...7 кг отбирались из коренных обнажений гранитоидов и из имеющихся карьерных выработок. Аналитические исследования на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ проведены в лаборатории рентгеноспектрального анализа ИГМ СО РАН.

**Результаты.** Приводятся новые данные о механизме формирования глобулей псевдорутила и обосновывается эндогенный генезис минерала как продукта высокотемпературного окисления капельно-жидкого самородного интерметаллического соединения (Ti-Fe), обособившегося из расплава в особо восстановительных условиях, локально проявившихся на мантийном уровне. В длительно эволюционирующем мантийном магматическом очаге с участием глубинных газовых флюидов ( $H_2$ ,  $CH_4$ ) в условиях дефицита кислорода создавался восстановительный режим, благоприятный для ликвации рудных интерметаллических соединений (Ti-Fe). Восстановительные условия наиболее активно проявились в расплавах заключительных инъекций (3–4 фазы). Поступившие с расплавом капельно-жидкие интерметаллиды (Ti-Fe) в условиях резко повышенного парциального давления кислорода подверглись полному высокотемпературному окислению с формированием на раннемагматической стадии закалённой однородной фазы псевдорутила с примесью Mn, Si, Al, Ca, K. Сделан вывод о геохимической специализации гранитоидного комплекса на железо и титан.

### Ключевые слова:

Гранитоиды, акцессорные минералы, самородные интерметаллиды, глобули, псевдорутил.

### Введение

Псевдорутил  $Fe_2Ti_3O_9$ , в отечественной минералогической литературе относится к числу малоизученных минералов. Генезис его обычно рассматривается как типично низкотемпературный экзогенный и представляется как промежуточный продукт окисления между ильменитом и рутилом [1]. Наряду с существующими представлениями о низкотемпературном образовании псевдорутила, исследованиями акцессорных минералов гранитоидов Чукотки [2] показана возможность формирования этого минерала в эндогенном процессе.

В гранитоидах впервые среди раннемагматических акцессорных и породообразующих минералов обнаружен псевдорутил с весьма необычной для него округлой формой зёрен. Подобные формы принято называть глобулями, сферулами, шариками и использовать в качестве типоморфного признака самородных металлов или интерметаллических соединений эндогенного происхождения [3–6].

Цель работы – исследование распространенности и химического состава глобулей псевдорутила в гранитоидах последовательных дифференциатов алюмо-силикатного расплава, парагенетической их ассоциации, выяснение физико-химической обстановки этапа формирования глобулей псевдорутила как продукта преобразования главных рудообразующих элементов – титана и железа. Как из-

вестно, с девонскими гипабиссальными гранитоидными интрузиями в пределах Рудного Алтая ассоциируют контактово-метасоматические месторождения магнетитовых руд, что определяет актуальность исследований.

### Краткая петролого-геохимическая характеристика гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса

Алейско-змеиногорский комплекс ( $D_{2-3}$ ) включает три крупных гранитоидных массива – Новониколаевский, Алейский, Устьянский, и ряд более мелких тел, локализованных в структурах северной части Алейского поднятия Рудного Алтая между девонскими вулканогенно-осадочными прогибами; контролируются глубинными разломами северо-западного и субширотного простирания и характеризуются наличием комагматических связей с девонскими вулканитами каменевского комплекса [7, 8]. Наибольшую площадь (более 1000 кв. км) занимает Новониколаевский батолит, расположенный в северном окончании Алейского антиклинория, имеет сложное полифазное строение и включает полный ряд пород гомодромной последовательности – от ранней габброидной до заключительной, четвертой, лейкогранитной фазы с биотитовыми и биотит-мусковитовыми разностями. Габброиды первой фазы внедрения интенсивно метаморфизованы и образуют мелкие ксенолитовые тела в гранитоидах после-

дующих фаз. Наибольшим распространением пользуются гранитоиды – производные второй, главной, фазы и заключительной лейкогранитовой. Алейский и Устьянский массивы, значительно меньшие по площади (около 300 кв. км каждый), расположены соответственно на юге и юго-западе поднятия. Доминирующие породы Алейского массива – тоналиты и плагиограниты, приобретающие в тектонически ослабленных зонах гнейсовидный облик с биотитом и зеленой роговой обманкой. Гранитоиды Устьянского массива, лейкократовые по составу, параллелизуются с лейкогранитами заключительной четвертой фазы.

Основные петрохимические характеристики гранитоидов в краткой констатации сводятся к следующему (от плагиогранитов и тоналитов ранней фазы к лейкогранитам заключительной): 1) возрастают коэффициент апаитности (0,56...0,90) и общей щёлочности пород при доминировании  $\text{Na}_2\text{O}$  над  $\text{K}_2\text{O}$ , за исключением лейкогранитов Устьянского массива, имеющих калиевую специализацию; 2) заметно возрастает глинозёмистость пород (0,78...0,91); 3) растёт коэффициент железистости (0,77...3,75) при сравнительно выдержанном коэффициенте окисленности железа (0,81...0,84) за исключением лейкоплагиогранитов третьей фазы, в которых этот показатель резко повышается до 1,22; 4) снижаются коэффициенты известковистости (0,43...0,09) и титанистости (9,89...5,44).

Характерные геохимические особенности гранитоидов – отсутствие элементов-примесей халькофильной группы, весьма ограниченный набор и низкие содержания сидерофильных Co, Ni, Cr, Sc, V, которые концентрируются преимущественно в наиболее ранних дифференциатах гранитоидного расплава. Наиболее многочисленную группу составляют литофильные элементы, среди которых содержание Ti в плагиогранитах главной фазы превышает значение кларка (коэффициент концентрации Ti 1,22...2,2), в породах последующих фаз KкTi снижается до 0,43...0,95. Гранитоиды заметно обогащены РЗЭ, в том числе Y, образующим избыточные концентрации (KкY=1,2...1,95), за исключением плагиогранитов Алейского массива, в которых содержание этого элемента относится к дефицитным.

Ведущая ассоциация акцессорных минералов в плагиогранитах и тоналитах главной фазы титаномагнетит-ильменит-феррорутит-циркон-апатит-сфен-ортитовая; в лейкогранитах заключительной фазы сменяется на мартитизированный титаномагнетит-гематит-циркон-топаз-флюорит-редкоземельную с Y, Ce, La и уран-ториевую. Среди акцессорных минералов в гранитоидах рассматриваемых фаз отсутствуют сульфиды магматического генезиса, что также подчеркивает дефицит серы в гранитоидных расплавах и достаточно высокий потенциал кислорода.

По условиям формирования, петролого-геохимическим особенностям гранитоидные массивы

рассматриваются как индивидуализированные части крупного плутона, сформированного из единого магматического центра активизированной континентальной окраины в средне-позднедевонское время. Новониколаевский и Алейский массивы близки к гранитам I-типа, Устьянский относится к А-типу [7, 8].

**Методика исследований включает:** 1) полевой отбор минералогических проб гранитоидов последовательных интрузивных фаз комплекса с последующей их лабораторной обработкой и извлечением акцессорных минералов; 2) аналитические исследования.

Минералогические пробы весом 5...7 кг отбирались из коренных обнажений гранитоидов и из имеющихся карьерных выработок. Изготовление препаратов (шашек) для анализа химического состава акцессорных минералов выполнено ведущим инженером ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) Ю.И. Маликовым. Аналитические исследования на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ проведены в лаборатории рентгеноспектрального анализа ИГМ СО РАН (г. Новосибирск, аналитик мл. науч. сотр. М.В. Хлестов, при участии автора).

#### Результаты исследований

Псевдуртил в единичных округлых зёрнах установлен в электромагнитной фракции протолок плагиогранит-порфира и лейкоплагиогранита соответственно второй и третьей интрузивных фаз (Алейский массив) и в лейкограните заключительной четвертой фазы (Устьянский массив). В гранитоидах главной фазы (Новониколаевский батолит) глобулы псевдуртила не обнаружены; единичная сфераула этого минерала встречена в лейкоплагиогранитах – производных третьей фазы, слагающих небольшое тело в северном окончании Новониколаевского массива.

Морфология зёрен псевдуртила в изученных породах однотипная – мелкие шарики размером 0,1...0,2 мм, реже несколько вытянутые, грушевидные. В лейкограните Устьянского массива кроме одиночных шариков обнаружен сросток двух глобулей, близких по размерам – 0,1 и 0,08 мм в диаметре. Цвет минерала серовато-черный с бронзоватым отливом, блеск обычно матовый, реже металловидный. На поверхности сферул и в их разрезах обычно наблюдаются многочисленные поры – следы газовых включений от микронных размеров до сотых долей миллиметра. Отдельные, наиболее крупные, пустотки заполнены агрегатом зёрен породообразующих минералов – кварца (рис. 1), плагиоклаза ( $\text{An}_{10-15}$ ), калиевого полевого шпата, титанистого биотита (рис. 2). Ровные, дугообразно-вогнутые или близкие к прямолинейным границы сростаний зёрен породообразующих минералов с поверхностью глобулей свидетельствуют о заполнении их пустоток породообразующими минералами после кристаллизации глобулей. Электронно-

**Таблица 1.** Химический состав глобулей псевдорутила из гранитоидов различных интрузивных фаз, мас. %

**Table 1.** Chemical composition of pseudorutile globules from granitoids of different igneous phase, wt. %

Порода (интрузивная фаза) Rock (igneous phase)	№	TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Сумма Total
Алейский массив/Aleysk massif									
Плагιοгранит-порфир (вторая, главная) Plagiogranite porphyry (second, main)	1	55,95	15,58	7,71	7,01	5,88	6,03	–	98,16
	2	56,86	16,06	7,55	6,82	5,65	5,72	–	98,67
	3	55,61	15,77	7,75	6,93	6,1	6,28	–	98,45
	4	55,91	15,8	7,89	7,18	6,14	6,11	–	99,04
	5	57,43	15,58	6,96	6,95	5,61	5,88	–	98,41
	6	57,43	14,88	6,88	6,9	5,69	5,96	–	97,75
	7	56,95	15,35	7,22	6,93	5,86	6,09	–	98,4
	$\bar{X} (\sigma)$	56,59 (0,57)	15,57 (0,14)	7,42 (0,16)	6,96 (0,01)	5,85 (0,05)	6,01 (0,03)	–	98,41
Лейкоплагιοгранит (третья) Leucoplagiograne (third)	1	52,89	13,69	6,69	7,22	10,25	7,89	–	98,6
	2	52,29	13,44	6,96	7,12	9,84	8,83	–	98,5
	3	52,36	13,79	7,17	6,82	9,97	8,63	–	98,7
	4	53,13	13,6	6,9	6,88	9,69	8,73	–	98,9
	5	52,81	13,83	7,27	6,99	9,69	8,7	–	99,3
	6	52,64	13,48	7,23	6,84	9,71	8,79	–	98,7
	7	52,38	13,77	7,23	6,86	9,78	8,56	–	98,6
	$\bar{X} (\sigma)$	52,64 (0,1)	13,66 (0,02)	7,06 (0,05)	6,96 (0,02)	9,85 (0,04)	8,6 (0,1)	–	98,76
Новониколаевский массив Novonikolaevsky massif									
Лейкоплагιοгранит (третья) Leucoplagiograne (third)	1	51,49	15,8	6,51	6,5	12,52	5,08	0,61	98,5
	2	52,13	16,0	6,37	6,41	11,98	5,04	0,61	98,6
	3	51,19	15,4	6,99	6,65	12,58	5,39	0,59	98,8
	4	51,16	16,4	6,9	6,52	12,79	5,36	0,69	99,8
	5	52,13	15,6	6,4	6,52	12,75	5,02	0,65	99,1
	6	52,08	15,9	6,55	6,41	12,41	4,95	0,67	98,9
	7	51,21	16,2	6,37	6,58	12,0	5,14	0,52	98,0
	$\bar{X} (\sigma)$	51,63 (0,21)	15,9 (0,12)	6,58 (0,07)	6,51 (0,007)	12,43 (0,1)	5,14 (0,03)	0,62 (0,003)	98,8
Устьянский массив Ustyansky massif									
Лейкогранит (четвёртая) Leucogranite (fourth)	1	55,75	15,9	7,0	7,26	6,33	5,39	0,27	97,89
	2	56,66	15,57	6,96	7,14	6,29	5,48	–	98,11
	3	56,86	15,81	6,71	7,37	6,03	5,44	–	98,23
	4	56,88	15,59	6,95	7,26	5,78	5,51	–	97,96
	5	56,63	15,7	6,95	7,18	6,25	5,61	–	98,31
	6	56,16	15,85	7,14	7,22	6,16	5,48	–	98,02
	7	55,51	15,63	7,17	7,35	6,48	5,47	0,2	97,82
	$\bar{X} (\sigma)$	56,35 (0,3)	15,72 (0,02)	6,98 (0,02)	7,25 (0,01)	6,19 (0,05)	5,48 (0,01)	–	97,97

Примечание: здесь и в других таблицах FeO принято как Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;  $\bar{X}$  – среднее содержание,  $\sigma$  – величина дисперсии; прочерк – элемент не установлен.

Note: in Tables 1 and 2 FeO is conventionally termed as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;  $\bar{X}$  – average content;  $\sigma$  – dispersion value; dash – below detection limits.

микроскопическими исследованиями различных уровней срезов матрицы глобулей псевдорутила выявлено её однородное строение.

Химический состав анализировался как площадным сканированием матрицы зерна, так и по его профилю с расстоянием между анализируемыми точками 5...6  $\mu\text{m}$  (рис. 1). В составе псевдорутила (табл. 1) постоянно присутствуют примеси элементов литофильной группы – Mn, Al, Si, Ca. В различных концентрациях названные литофильные элементы также указываются в составе

псевдорутила в ряде работ зарубежных исследователей [9–13]. Стабильной примесью K (0,52...0,69 мас. %) выделяется псевдорутил лейкоплагιοгранитов – производных третьей фазы, этот же элемент зафиксирован в меньших концентрациях (0,2...0,27 мас. %) в двух периферийных точках – 1 и 7 (рис. 1) профиля зерна псевдорутила из лейкогранита Устьянского массива, и его присутствие, видимо, связано с ассимиляцией калия кристаллизующимся глобулем из окружающего алюмосиликатного расплава.

Кристаллохимические формулы псевдорутила  $\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$  (вычислены по средним содержаниям компонентов).

Гранит-порфир, 2 фаза (Алейский массив)

$(\text{Fe}_{0,87}\text{Mn}_{0,418}\text{Si}_{0,388}\text{Ca}_{0,43})_{2,106}(\text{Ti}_{2,845}\text{Al}_{0,543})_{3,388}\text{O}_9$

Лейкоплагиогранит, 3 фаза (Алейский массив)

$(\text{Fe}_{0,746}\text{Mn}_{0,391}\text{Si}_{0,64}\text{Ca}_{0,602})_{2,379}(\text{Ti}_{2,59}\text{Al}_{0,534})_{3,124}\text{O}_9$

Лейкоплагиогранит, 3 фаза

(Новониколаевский массив)

$(\text{Fe}_{0,862}\text{Mn}_{0,363}\text{Si}_{0,806}\text{Ca}_{0,356})_{2,387}(\text{Ti}_{2,517}\text{Al}_{0,498})_{3,015}\text{O}_9$

Лейкогранит, 4 фаза (Устьянский массив)

$(\text{Fe}_{0,876}\text{Mn}_{0,393}\text{Si}_{0,412}\text{Ca}_{0,393})_{2,074}(\text{Ti}_{2,825}\text{Al}_{0,571})_{3,396}\text{O}_9$

Содержание примесных элементов по профилю зерна псевдорутила варьирует незначительно – величина дисперсии находится в пределах 0,02...0,07 (табл. 1), лишь незначительный разброс концентраций отмечен для Ti – главного минералообразующего элемента, особенно в глобуле из плагиогранит-порфира, где величина дисперсии наиболее высокая – 0,67. Заметные отличия химического состава псевдорутила из гранитоидов последовательных интрузивных фаз наблюдаются по содержанию в них Si и Ca. Так, глобулы псевдорутила лейкоплагиогранитов третьей фазы (Алейский массив) выделяются повышенной известковистостью и кремнезёмистостью, что в целом согласуется с петрохимическими особенностями этих пород. Заметно обособляется химический состав глобулы псевдорутила лейкоплагиогранитов 3 фазы (Новониколаевский массив) примесью калия и насыщенностью кремнезёмом – до 12,43 мас. % (табл. 1). По своим петрохимическим особенностям породы, производные рассматриваемой фазы, характеризуются щёлочностью не калиевой, а существенно натриевой направленности ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=4,88/1,76$  мас. %), повышенными и резко варьирующими содержаниями  $\text{SiO}_2$  (75,62–81,53 мас. %), что отразилось и на кремнезёмистости глобул псевдорутила. В табл. 1 приведены кристаллохимические формулы глобул псевдорутила, вычисленные по средним содержаниям в них компонентов. Как известно, Fe относится к числу наиболее изоморфнофильных элементов [14] и охотно замещается по схеме изовалентного или гетеровалентного изоморфизма:  $\text{Fe}^{3+} \leftarrow \text{Mn}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Si}^{4+}$ ; несколько меньшей изоморфной ёмкостью обладает  $\text{Ti}^{4+}$  и с  $\text{Al}^{3+}$  образует ограниченный изоморфизм [14, 15]. Калий в составе псевдорутила участвует как неструктурная примесь и в его формуле не указан. В приведённых кристаллохимических формулах несколько превышены суммы катионов групп  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Ti}^{4+}$ , что, возможно, обусловлено присутствием в минерале воды, наличие которой в псевдорутиле в форме (ОН) или  $\text{H}_2\text{O}$  отмечается в работах [10, 11]. Неучтенное количество  $\text{H}_2\text{O}$  в его кристаллохимической фор-

муле, видимо, обусловило избыток атомных количеств элементов в позициях  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Ti}^{4+}$ . Возможно, присутствием  $\text{H}_2\text{O}$  в анализируемом псевдорутиле объясняется несколько пониженная сумма химического состава глобул (табл. 1).

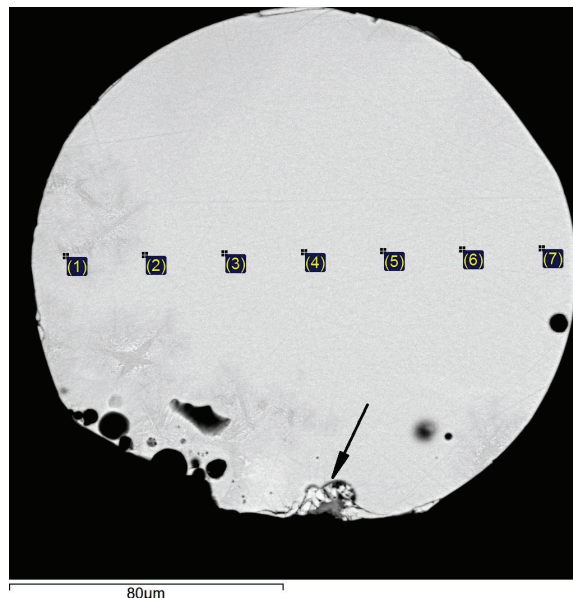
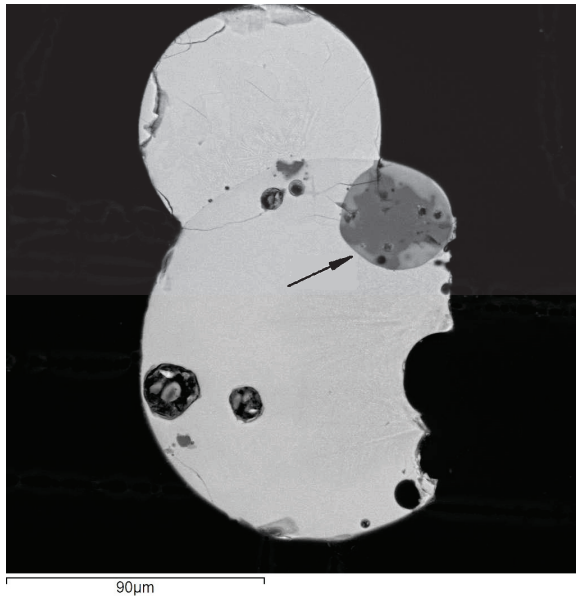


Рис. 1. Срез глобуля псевдорутила с многочисленными мелкими округлыми пустотками по периферии зерна. Стрелкой указана пустотка, заполненная агрегатом кристаллитов кварца. Цифрами показаны номера точек анализов, приведённых в табл. 1. Лейкоплагиогранит, Алейский массив. Здесь и на последующих рисунках изображение в обратно рассеянных электронах

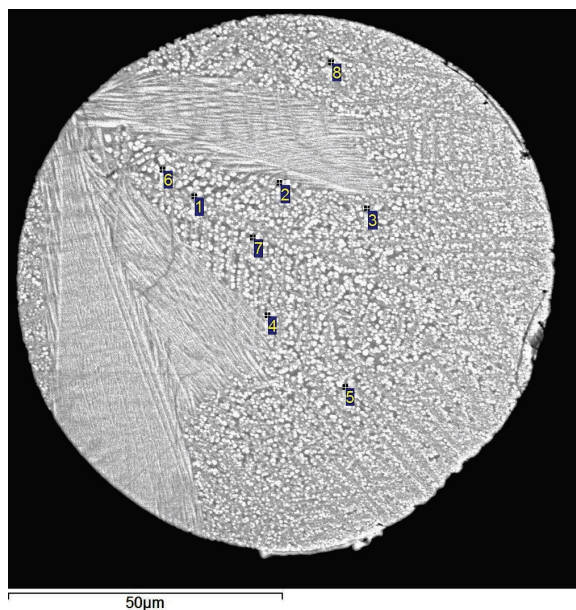
Fig. 1. Pseudorutile globule section with numerous rounded blebs along grain periphery. The arrow indicates the bleb with quartz crystalline grain aggregate filling. The numbers indicate analysis points, referred in table 1. Leucoplagiogranite, Aleysk massif. In all diagrams – backscattered electron image

В лейкограните Устьянского массива, наряду с однородными глобулами, обнаружено единичное сферическое зерно с чётко проявившейся сложной структурой распада двухкомпонентного твёрдого раствора в виде чередующихся светлых и темных фаз. Наибольшую площадь матрицы занимает светлая фаза, образующая два морфологических типа структур: 1) конусовидную микроглобулярную, по периферии зерна переходящую в эмульсионную; 2) линейно-ориентированную с тонкими перистыми, веероподобными прерывистыми полосками (рис. 3). Химический состав светлой и тёмной фаз незначительно отличается лишь концентрациями минералообразующих компонентов, главным образом Ti, Fe, Mn при сравнительно неизменных в светлых и тёмных фазах содержаниях Al, Si, Ca (табл. 2).



**Рис. 2.** Срез сростка двух глобулей псевдорутила с многочисленными округлыми пустотками микронных и более крупных размеров (0,02...0,04 мм), приуроченными к периферии зёрен. Стрелкой указана округлая пустотка с ровными границами, заполненная зёрнами кварца, ортоклаза, титанистого биотита. Ровные вогнутые границы среза глобуля (справа) обусловлены выпавшим агрегатом зёрен минералов при изготовлении препарата. Лейкогранит, Устьянский массив

**Fig. 2.** Cross-section of two pseudorutile globule growth with numerous micron or large-sized voids (0,02...0,04 mm), confined to grain periphery. The arrow shows rounded void with even edges, filled with quartz, orthoclase, titanian biotite grains. Even concave boundaries of globule cross-section (right) is caused by precipitated aggregates from mineral grains during sample preparation. Leucogranite, Ustyansky massif



**Рис. 3.** Сложно-комбинированная структура распада твёрдого раствора псевдорутила

**Fig. 3.** Complex-combined structural breakdown of solid pseudorutile solution

**Таблица 2.** Химический состав светлых и тёмных фаз структуры распада твёрдого раствора псевдорутила, мас. %

**Table 2.** Chemical composition of light and dark zones of breakdown structure of pseudorutile solid solution, wt. %

№ точек анализов Points of analysis	TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Сумма Total
Светлая фаза/Light zone							
1	50,04	19,62	12,05	7,24	5,65	5,71	100,3
2	47,41	18,64	11,21	7,95	6,89	7,37	99,5
3	44,12	15,1	8,44	10,52	9,76	10,6	98,5
4	50,7	17,4	8,15	8,13	7,4	6,34	98,1
Тёмная фаза/Dark zone							
5	57,28	15,99	8,74	7,01	5,26	5,57	99,9
6	57,3	16,33	8,69	6,88	5,52	5,58	100,0
7	55,75	13,07	6,91	9,16	7,53	7,3	99,7
8	57,85	15,57	8,2	7,33	5,37	5,67	100,0

Примечание. Номера точек анализов соответствуют номерам точек на рис. 3.

Note: Number of analysis points corresponds to point numbers in Fig. 3.

### Обсуждение результатов исследований

Сферическая форма зёрен самородных металлов и интерметаллических соединений в эндогенных образованиях широко используется петрологами как типоморфный признак ликвационной природы рудного вещества, отделившегося от магматического расплава в форме капель [3, 4]. Тенденция к отделению металлизированных рудных капель, локально проявившаяся в гранитоидах изучаемого комплекса, ранее установлена автором [6] на примере единичных находок глобулей феррита, а также самородного железа с примесью Ti, Mn и продукта их окисления – магнетита.

Анализ распространённости сферических зёрен псевдорутила, их строения, химического состава и парагенетической ассоциации в гранитоидах последовательных фаз позволяет рассматривать их формирование как результат полного окисления изначально капельно-жидкого интерметаллического соединения (Ti-Fe), отделившегося из алюмосиликатного расплава. Согласно существующим представлениям [3, 16–18], ликвация рудных капель происходит в глубинном магматическом очаге, в его локальных участках и в сильно восстановительной среде при поступлении в расплав мантийных восстановленных газовых флюидов, которые представлены преимущественно водородными, реже метановыми разностями. По данным термодинамических и петрологических исследований [16–18], отделение от расплава капель литофильных элементов, к числу которых относится легко окисляемый Ti, требует особо восстановительных условий, однако в соединении с Fe рудные капли становятся более устойчивыми к окислительным условиям среды.

Поступившие с расплавом в камеру кристаллизации обособившиеся интерметаллические соединения (Ti-Fe) находились в капельно-жидком состоянии, и в процессе горизонтального растекания расплава происходило слияние отдельных их ка-



пель, что наглядно проявилось в лейкограните Устьянского массива – производного заключительной фазы (рис. 2). По данным А. Хансена и К. Андерко [19], температура начала кристаллизации сплава  $Ti_2Fe$  (в ат. % ~70 % Ti и ~30 % Fe) составляет 1085 °С. Температура кристаллизации изучаемых гранитоидов, определённая по минералогическому и петрохимическому геотермометрам [20], составляет 850–900 °С. Наблюдаемые взаимоотношения раннемагматических порообразующих минералов (кварца, плагиоклаза, биотита) с глобулями псевдорутила (рис. 2), а также наличие включений округлых зёрен этого минерала в плагиоклазе ( $An_{10-15}$ ) позволяют сделать вывод о субликвидусной кристаллизации капель интерметаллида (Ti–Fe) при  $T \leq 1085$  °С. В условиях резкого увеличения окислительного потенциала гипабиссальной камеры кристаллизации ещё жидкие и сохраняющие высокую  $T^\circ$  обособившиеся капли интерметаллида (Ti–Fe), находясь в неравновесном состоянии с окружающим расплавом, вступают в реакцию с окислительной газовой фазой, и в первую очередь окисляется Ti, как элемент с наибольшим сродством к кислороду. В реакцию высокотемпературного окисления капли интерметаллида из окружающего расплава вовлекаются другие оксифильные петрогенные элементы ранней стадии кристаллизации – Mn, Al, Si, Ca, и участвуют в формировании кристаллической решётки псевдорутила, унаследовавшего необычную для данного минерала сферическую форму. В составе глобулей псевдорутила, как отмечалось, не исключается присутствие воды в форме (ОН) или кристаллогидратной  $H_2O$ . Наличие многочисленных пор на поверхности сферул и в их срезах указывает на имевшую место сорбцию жидким интерметаллидом (Ti–Fe) из окружающего расплава водорода, который в процессе высокотемпературного окисления легко трансформировался в  $H_2O$ , также участвовавшую в образовании псевдорутила. Выдержанный химический состав по площади матрицы глобуля псевдорутила указывает на кратковременную и активно прошедшую до конца реакцию высокотемпературного окисления жидкого интерметаллида (Ti–Fe) с формированием однородной закалённой фазы. Проявившаяся сложно-комбинированная структура распада твёрдого раствора в единичном зерне псевдорутила, видимо, объясняется неодинаковой степенью окисления в камере кристаллизации Устьянского массива. Различная степень высокотемпературного окисления нередко проявляется даже в отдельных участках одного

кристалла [21]. Кроме того, повышенная щёлочность расплава калиевой направленности, характерная для лейкогранитов данного массива, также способствовала более длительному и интенсивному окислению интерметаллида.

Ассоциация примесных элементов в глобулях псевдорутила в производных последовательных дифференциатов остаётся неизменной и свидетельствует о длительно функционирующем глубинном мантийном источнике алюмосиликатного расплава, обогащённого литофильными элементами и обеднённого халькофильными. Повышенная кремнезёмистость и появление примеси калия в глобулях лейкоплагиогранитов 3 фазы (Новониколаевский массив), видимо, обусловлены активизацией флюидно-магматического взаимодействия в силикатном расплаве. Поступающие мантийные флюиды в виде соединений KCl и KF повышают относительную долю калия в расплаве, а флюиды KCl, кроме того, стимулируют рост кремнезёмистости пород [22, 23]. Насыщенность псевдорутила кремнезёмом и появление примеси  $K_2O$  указывает на активность существенно хлоридного флюида, участие которого в расплаве проявилось и в составе акцессорного хлорапатита, биотита, роговой обманки.

#### Выводы

1. Происхождение глобулей псевдорутила в девонских гранитоидах алейско-змеиногорского комплекса связано с кратковременной реакцией полного высокотемпературного окисления капельно-жидких обособлений интерметаллических соединений титана и железа, поступивших с расплавом в гипабиссальную камеру с резко повышенной активностью кислорода. Элементы-примеси псевдорутила отражают химизм среды кристаллизации расплава раннемагматической, субликвидусной, стадии кристаллизации.
2. В длительно эволюционирующем мантийном магматическом очаге с участием глубинных газовых флюидов ( $H_2$ ,  $CH_4$ ) в условиях дефицита кислорода создавался восстановительный режим, благоприятный для ликвации рудных интерметаллических соединений (Ti–Fe). Восстановительные условия в объёмах расплава носили локальный характер и наиболее активно проявились в расплавах заключительных инъекций (3–4 фазы) с участием калиевых хлоридных флюидов, способствующих насыщению расплавов кремнезёмом и калием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минералы. Справочник / под ред. акад. Ф.В. Чухрова. Т. II. Вып. 3. – М.: Наука, 1967. – 675 с.
2. Полякова Е.В. Ассоциация ильменита, пирофанита и псевдорутила в гранитах Северного массива (Чукотка) // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – С. 258–262.
3. Самородное минералообразование в платформенных базитах / Б.В. Олейников, А.В. Округин, М.Д. Томшин и др. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. – 188 с.
4. Гребенников А.В. Эндогенные сферулы мел-палеогеновых игнимбритовых комплексов Якутинской вулcano-тектонической структуры (Приморье) // Зап. Рос. Минер. общ-ва. – 2001. – Ч. СХХХХ. – № 3. – С. 56–68.
5. Гребенников А.В., Щека С.А., Карабцов А.А. Силикатно-металлические сферулы и проблема механизма игнимбритовых извержений (на примере Якутинской вулcano-тектонической структуры) // Вулканология и сейсмология. – 2012. – № 4. – С. 3–22.
6. Новоселов К.Л. Генетические особенности самородного железа и продуктов его окисления в девонских гранитоидах Алейско-Змеиногорского комплекса (северо-западная часть Рудного Алтая) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 56–67.
7. Туркин Ю.А. Тоналит-плагиогранит-лейкогранитовая формация Рудного Алтая // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2009. – № 2. – С. 70–79.
8. Туркин Ю.А., Новоселов К.Л. Петролого-геохимические особенности девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 5–15.
9. Hansen E., Reimink J., Harlov D. Titaniferous accessory minerals in very low-grade metamorphic rocks, Keweenaw Peninsula Michigan, USA // Lithos. – 2010. – № 116. – P. 167–174.
10. Pownceby M.I., Sparrow G.J., Fisher-White M.J. Mineralogical characterisation of Eucla Basin ilmenite concentrates – First results from a new global resource // Minerals Engineering. – 2008. – № 21. – P. 587–597.
11. Medaris L.G., Jr, Fournelle Jh.H. Pseudorutile in the Baraboo Range, Wisconsin: First recognition as a metamorphic mineral // The Canadian Mineralogist. – 2012. – V. 50. – P. 1165–1172.
12. A new Al-rich hydroxilian pseudorutile from Kalimantan, Indonesia / I.E. Grey, P. Bordet, N.C. Wilson, R. Townend, T.J. Bastow, M. Brunelli // American Mineralogist. – 2010. – V. 95. – P. 161–170.
13. Yawoos A. Kettanah, Sabah A. Ismail. Heavy mineral concentrations in the sandstones of Amij Formation with particular emphasis on the mineral chemistry and petrographic characteristics of monazite, western desert of Iraq // Journal of African Earth Sciences. – 2016. – V. 123. – P. 350–369.
14. Макаров Е.С. Изоморфизм атомов в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1973. – 288 с.
15. Пятенко Ю.А., Воронков А.А., Пудовкина З.В. Минералогическая кристаллохимия титана. – М.: Наука, 1976. – 155 с.
16. Флюидный режим формирования мантийных пород / Ф.А. Летников, Г.Д. Феоктистов, И.М. Остафийчук и др. – Новосибирск: Наука, 1980. – 143 с.
17. Никольский Н.С. Флюидный режим эндогенного минералообразования. – М.: Наука, 1987. – 199 с.
18. Oxidation Kinetics, Structural Changes and Element Migration during Oxidation Process of Vanadium-titanium Magnetite Ore / Feng Pan, Qing-shan Zhu, Zhan Du, Hao-yan Sun // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2016. – V. 23. – Iss. 11. – P. 1160–1167.
19. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. 2. – М.: Металлургиздат, 1962. – 1165 с.
20. Новоселов К.Л., Туркин Ю.А. Типоморфизм акцессорного титаномагнетита девонских гранитоидов Северо-Западной части Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 5–16.
21. Магнетизм и условия образования изверженных горных пород / Д.М. Печерский, В.И. Бачин, С.Ю. Бродская и др. – М.: Наука, 1975. – 288 с.
22. Маракушев А.А. Петрогенезис. – М.: Недра, 1988. – 293 с.
23. Маракушев А.А. Петрогенезис и рудообразование (геохимические аспекты). – М.: Наука, 1979. – 263 с.

Поступила 06.02.2017 г.

#### Информация об авторах

**Новоселов К.Л.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 549.514:549.01

## DISTRIBUTION AND GENESIS OF SPHERICAL ACCESSORY PSEUDORUTILE GRAINS IN DEVONIAN GRANITOIDS OF ALEYSKO-ZMEINOGORSK COMPLEX (N-W RUDNI ALTAI)

Konstantin L. Novoselov,  
nkonstantin1@rambler.ru

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

*The relevance of the issue is caused by the need to study the rounded micro-grains (globules, spherules) of pseudorutile accessories found in Aleysko-Zmeinogorsk granitoid complex (D<sub>2-3</sub>).*

**The aim** of the research is to study in details occurrence and chemical composition of pseudorutile globules in granitoids being subsequent alumina-silicate melt differentiates, paragenetic associations, pseudorutile globule formations as altered product of primary ore-forming elements – titanium and ferrium.

**The research methods.** Mineralogical samples of 5...7 kg were extracted from both granitoid outcroppings and quarries. Analytical analysis was carried out on electron scanning microscope (ESM) JSM-6510LV (Jeol Ltd) and energy-dispersive spectrometer INCA Energy 350+ in the Laboratory of X-ray Spectrum Analysis, Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, RAS (Novosibirsk).

**The results.** The paper introduces new data on formation mechanism of pseudorutile globules. The endogenous genesis of mineral as a product of high-temperature oxidation of drop-liquid native intermetallic compound (Ti-Fe) from melt under reducing conditions is proved. Throughout the mantle magmatic chamber evolution involving deep gaseous fluids (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) under conditions of oxygen deficiency the reduction regime was formed being favorable for intermetallic ore compound (Ti-Fe) segregation. Reducing conditions appeared within the melt itself and especially, in final phase melts (3–4). Under conditions of increasing facies pressure of oxygen the liquid-drop intermetallics (Ti-Fe) are subjected to high-temperature oxidation within the early magmatic stage of homogeneous pseudorutile phase with Mn, Si, Al, Ca, K impurities.

### Key words:

Granitoids, accessory minerals, native intermetallics, globules, pseudorutile.

### REFERENCES

1. *Mineraly. Spravochnik* [Minerals. Reference book]. Ed. by F.V. Chukhrov. Vol. II, Iss. 3. Moscow, Nauka Publ., 1967. 675 p.
2. Polyakova E.V. Associations of ilmenite, pyrophanite and pseudorutile in granites of Severnoe massif (Chukotka). *Zapiski Gornogo instituta*, 2013, vol. 200, pp. 258–262. In Rus.
3. Oleynikov B.V., Okrugin A.V., Tomshin M.D. *Samorodnoe mineraloobrazovanie v platformnykh bazitakh* [Native mineral formations in platform basites]. Yakutsk, YaF SO ANSSSR Press, 1985. 188 p.
4. Grebennikov A.V. Endogenous spherules of Cretaceous-Paleogene ignimbrite complexes in Yakutsk volcano-tectonic structure (Primorye). *Proceedings of Russian Mineralogical Society*, 2001, Ch. CXXXX, no. 3, pp. 56–68. In Rus.
5. Grebennikov A.V., Shcheka S.A., Karabtsov A.A. Silikatno-metallicheskie sferuly i problema mekhanizma ignimbitovykh izverzheniy (na primere Yakutinskoy vulkano-tectonicheskoy struktury) [Silicate-metallic spherules and mechanisms of ignimbrite eruptions (case study: Yakutsk volcano-tectonic structure)]. *Volcanology and seismology*, 2012, no. 4, pp. 3–22.
6. Novoselov K.L. Genetic features of native iron and its oxidation products in Devonian granitoids of Aleysko-Zmeinogorsk complex (N-W Rudni Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 56–67. In Rus.
7. Turkin Yu.A. Tonalit-plagiogranit-leykogramitovaya formatsiya Rudnogo Altaya [Tonalite-plagiogranite-leucogranite formation in Rudni Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*, 2009, no. 2, pp. 70–79.
8. Turkin Yu.A., Novoselov K.L. Petrological and geochemical features of Devonian granitoids in north-west part of Rudni Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 5–15. In Rus.
9. Hansen E., Reimink J., Harlov D. Titaniferous accessory minerals in very low-grade metamorphic rocks, Keweenaw Peninsula Michigan, USA. *Lithos*, 2010, no. 116, pp. 167–174.
10. Pownceby M.L., Sparrow G.J., Fisher-White M.J. Mineralogical characterisation of Eucla Basin ilmenite concentrates – First results from a new global resource. *Minerals Engineering*, 2008, no. 21, pp. 587–597.
11. Medaris L.G., Jr, Fournelle Jh.H. Pseudorutile in the Baraboo Range, Wisconsin: First recognition as a metamorphic mineral. *The Canadian Mineralogist*, 2012, vol. 50, pp. 1165–1172.
12. Grey I.E., Bordet P., Wilson N.C., Townend R., Bastow T.J., Brunelli M. A new Al-rich hydroxilian pseudorutile from Kalimantan, Indonesia. *American Mineralogist*, 2010, vol. 95, pp. 161–170.
13. Yawooz A. Kettanah, Sabah A. Ismail. Heavy mineral concentrations in the sandstones of Amij Formation with particular emphasis on the mineral chemistry and petrographic characteristics of monazite, western desert of Iraq. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, no. 123, pp. 350–369.
14. Makarov E.S. *Izomorfizm atomov v kristallakh* [Isomorphism of atoms in crystals]. Moscow, Atomizdat Publ., 1973. 288 p.
15. Pyatenko Yu.A., Voronkov A.A., Pudovkina Z.V. *Mineralogicheskaya kristalloghiya titana* [Mineralogical crystallogchemistry of titanium]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 155 p.
16. Letnikov F.A., Feoktistov G.D., Ostafiychuk I.M. *Flyuidnyy rezhim formirovaniya mantiynykh porod* [Fluid regime in mantle rock formation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 143 p.
17. Nikolskiy N.S. *Flyuidny rezhim endogennogo mineraloobrazovaniya* [Fluid regime in endogenous mineral formation]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 199 p.
18. Feng Pan, Qing-shan Zhu, Zhan Du, Hao-yan Sun. Oxidation Kinetics, Structural Changes and Element Migration during Oxidation Process of Vanadium-titanium Magnetite Ore. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2016, vol. 23, Iss. 11, pp. 1160–1167.

19. Khansen M., Anderko K. *Struktury dvoynykh splavov* [Structure of two-component alloys]. Moscow, Metallurizdat Publ., 1962. Vol. 2, 1165 p.
20. Novoselov K.L., Turkin Yu.A. Typomorphism of accessory titanium-magnetite in Devonian granitoids (N-W Rudni Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 5–16. In Rus.
21. Pecherskiy D.M., Bachin V.I., Brodskaya S.Yu. *Magnetizm i usloviya obrazovaniya izverzhennykh gornyykh porod* [Magnetism and igneous rock formation conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 288 p.
22. Marakushev A.A. *Petrogenезis* [Petrogenesis]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 293 p.
23. Marakushev A.A. *Petrogenезis i rudoobrazovanie (geokhimicheskie aspekty)* [Petrogenesis and mineral formation (geochemical aspects)]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 263 p.

*Received: 6 February 2017.*

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

**Konstantin L. Novoselov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.424:622.343.5:622'17

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО ТЕХНОГЕНЕЗА (Г. МЕДНОГОРСК)

Корнеева Татьяна Владимировна<sup>1</sup>,  
korneevatv@ipgg.sbras.ru

Юркевич Наталия Викторовна<sup>1,2</sup>,  
yurkevichnv@ipgg.sbras.ru

Аминов Павел Гаязович<sup>3</sup>,  
aminovp@mail.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса 20, I-304.

<sup>3</sup> Институт минералогии УрО РАН,  
Россия, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник.

**Актуальность работы** продиктована крупномасштабным загрязнением природных водоемов и рек, которое происходит при впадении в них дренирующих и сезонных потоков из хвостохранилищ и техногенных отвалов, содержащих высокие концентрации металлов, сульфатов и других компонентов. Оценка степени равновесия природно-техногенных вод к гидрогенным минералам в настоящее время является актуальной задачей, решение которой позволит описать природу геохимической специфики техногенных вод и механизмы их формирования, определить источники химических элементов и процессы вторичного минералообразования, формы миграции токсичных элементов в техногенных потоках и их влияние на окружающую среду.

**Цель работы:** исследование закономерностей вторичного минералообразования в техногенных потоках как основного фактора выведения металлов из растворов.

**Методы исследования.** Физико-химическое моделирование химических форм нахождения элементов в растворе рассчитывалось при помощи программы WATEQ4f. Одновременно рассчитывались индексы насыщения, указывающие на потенциальную недосыщенность или пересыщенность раствора по отношению к различным минеральным фазам.

**Результаты.** Изложены результаты физико-химического моделирования вод Медногорской геотехнической системы с применением программного пакета WATEQ4f. Рассчитаны химические формы нахождения элементов и индексы насыщения вод по отношению к ряду минеральных фаз. В исследуемых водах возможно формирование различных гидроксидов и ярозита различного состава, которые неустойчивы при впадении их в р. Жирикля и способны растворяться. Полученные данные свидетельствуют о переходе гётита в ферригидрит в зонах смешения Зеленого и Голубого техногенных ручьев и в реках Жирикля и Блява.

### Ключевые слова:

Рудничный дренаж, индекс насыщения, химические формы нахождения, моделирование, WATEQ4f, гидрохимия, техногенные отходы.

### Введение

Проблема окисления сульфидов и связанных с ними потоков кислого дренажа (acid mine drainage) является одним из основных направлений мировых исследований за последние 50 лет [1–4]. Химические реакции образования кислого дренажа давно описаны и не вызывают затруднений в понимании, однако конечный состав всегда зависит от геологических особенностей рудного региона, присутствия микроорганизмов, температуры, наличия воды, кислорода, проницаемости твердого вещества отходов и способности вмещающей породы нейтрализовать кислотность [5–7]. Эти факторы сильно варьируют для разных регионов, и по этой причине прогнозная оценка и способы предотвращения кислого рудничного дренажа должны быть тщательно рассмотрены с точки зрения особенностей горнодобывающих районов [8].

Локальные техногенные геохимические аномалии, образующиеся в сфере воздействия конкрет-

ных предприятий горнопромышленного профиля, рассматриваются многими исследователями как природно-техногенные полигоны для исследования процессов вовлечения химических веществ в природные миграционные потоки и взаимодействия техногенных веществ с природными субстратами [9–11]. Геохимические исследования дренажных вод рудных месторождений в последние годы получили достаточно широкое развитие. Связано это в основном с экологическими проблемами, возникающими в горнодобывающих районах и вызывающими необходимость оценки дренажных стоков месторождений как источников техногенного преобразования природной среды. Вытекающие из под сульфидсодержащих отвалов дренажные и техногенные рудничные воды могут отрицательно влиять на качество вод принимающих водотоков, приводя к понижению pH, увеличению общей минерализации, содержания сульфатов и растворенных форм металлов, что обуславливает необходи-



да и уравнений массового баланса с использованием метода непрерывных дробей, описанных В. Wiggley (1977). Программный код WATEQ4f успешно используется для геохимического моделирования как природных вод, так и водных растворов техногенного происхождения (рудничный дренаж). Эта программа была использована для расчета химических форм нахождения, ионной активности и индексов насыщения минеральными фазами в зависимости от измеренной температуры, значений рН, Eh и химического состава проб воды. Распределение химических форм нахождения и индексов насыщения послужили информацией для интерпретации химизма рудничного дренажа.

Рассчитывались индексы насыщения (ИН), представляющие отношения произведений активностей соответствующих компонентов к константе растворения одного из минералов:

$$SI = \lg(IAP/KT),$$

где IAP – равновесная концентрация соединения в растворе, мг/л, KT – константа растворимости соединения при заданной температуре, мг/л. Если ИН=0, раствор находится в равновесии с твердой фазой. При ИН>0 раствор пересыщен по отношению к данному минералу, и возможно его осаждение. При ИН<0 раствор недонасыщен по отношению к минеральной фазе, она будет растворяться. Рассчитав индексы насыщения раствора относительно минеральных соединений заданных элементов, можно сделать выводы о вероятном образовании тех или иных минералов в условиях, близких к равновесным. Расчет индексов насыщения – это простая и наглядная процедура для количественной оценки отклонения системы от равновесия, поскольку сразу же видна степень и направление этого отклонения: положительные их значения указывают на пересыщение раствора по отношению к твердой фазе и наоборот.

### Результаты и обсуждения

По результатам гидрохимического исследования подотвальные воды Блявинского рудника характеризуются разной окислительной обстановкой и минерализацией 3.3 и 13 г/л. Нейтральный ручей (Голубой) относится к сульфатно-гидрокарбонатному классу, Ca–Mg типу. Кислый ручей Зеленый – к сульфатному классу, Mg–Al–Ca техногенному типу. Значимыми для определения катионного типа воды в этом случае становятся алюминий, концентрация которого достигает 440 мг/л. Основной ионный состав р. Блявы изменяется по мере впадения в нее притоков. Наблюдается некоторое увеличение минерализации вниз по течению и смена основного ионного состава. Преимущественно гидрокарбонатный Ca–Na тип вод после впадения техногенных стоков сменяется на сульфатный (рис. 2).

Техногенные стоки впадают в реки Жирикля и Херсонка, которые являются правыми притоками второго порядка р. Блява. С их стоком в Блявинские воды поступают Cd, Zn, Ni, Cu, Pb, Fe, Mn и

Al, суммарные концентрации которых в антропогенных ручьях достигают значений вплоть до 0,5–0,9 г/л.

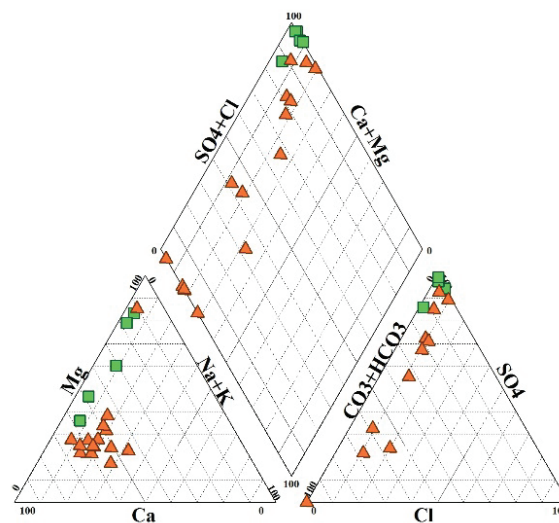


Рис. 2. Классификация поверхностных вод Медногорской ГТС (диаграмма Пайпера, содержания ионов в % экв.)

Fig. 2. Piper diagram showing the chemical composition of Mednogorsk surface water

Изучение химического состава природно-техногенных вод позволило классифицировать их по типам (рис. 3). Соответственно, речные воды на фоновых участках относятся к нейтральному низкометалльному типу по W. Ficklin [22], а весь спектр техногенных вод и зон их смешения с природными подразделяется на два типа – от нейтральных высокометалльных до кислых экстра-высокометалльных вод-рассолов.

Изучение химических форм нахождения металлов в поверхностных водах является важным аспектом при экологических исследованиях водоемов и водотоков, и в частности в зонах их смешения с техногенными потоками, так как именно на них происходит смена физико-химических, а, следовательно, и изменение химических форм нахождения элементов. По данным термодинамических расчетов, большинство металлов находится в водах преимущественно в ионной форме, вторыми по значимости являются сульфатные комплексы, как нейтральные, так и положительно и отрицательно заряженные. Согласно заданным физико-химическим параметрам, основной катионный состав изучаемых вод представлен в виде незакомплексованных ионов  $Ca^{2+}$  (50–80 %),  $Mg^{2+}$  (70–90 %),  $Na^+$  (99 %),  $K^+$  (90–99 %).

В фоновой точке (197) формы нахождения Al и Fe находятся исключительно в виде гидроксидных комплексов. Химические формы никеля представлены в виде нейтральных карбонатных  $NiCO_3^0$ ,  $Ni(CO_3)_2^{2-}$  и небольшой доли акваионных комплексов. Превалирующей формой для свинца также являются нейтральные карбонатные комплексы типа  $PbCO_3^0$ , с небольшой долей гидроксидных и акваионных форм. Медь находится в виде гидроксид-



Рис. 3. Состав поверхностных вод природных и техногенных ландшафтов Медногорской ГТС по Ficklin [22]

Fig. 3. Ficklin [22] diagram of the samples showing the composition of surface waters of natural and technogenic landscapes of Mednogorsk

ных и карбонатных комплексов. Для бария и кадмия преобладающими формами нахождения являются незакомплексованные ионы, с небольшой долей сульфатных ( $\text{BaSO}_4^0$ ,  $\text{CdSO}_4^0$ ), гидрокарбонатных ( $\text{BaHCO}_3^+$ ,  $\text{CdHCO}_3^+$ ) и хлоридных комплексов ( $\text{CdCl}^+$ ). Для марганца характерны свободнионные, карбонатные и гидрокарбонатные ( $\text{MnCO}_3^0$ ,  $\text{MnHCO}_3^+$ ) комплексы и небольшая доля сульфатных форм. У цинка те же самые формы, что и у марганца, однако доля карбонатных и гидрокарбонатных форм преобладает над аква-ионами.

Химические формы нахождения металлов в подотвальных ручьях разительно отличаются друг от друга, так же, как и различны их физико-химические условия. В Голубом ручье с нейтральным значением pH элементы находятся в виде свободных ионов, гидроксидов, карбонатов и гидрокарбонатов, сульфатов. Al(III) и Fe(III) в ручье находятся исключительно в виде гидроксидных комплексов. Медь и никель в растворе образуют большей частью нейтральные карбонатные комплексы типа  $\text{MeCO}_3^0$ , а также примерно в равных долях свободнионные  $\text{Me}^{2+}$  и сульфатные комплексы типа  $\text{MeSO}_4^0$ . Кроме того, медь образует гидроксидные формы в ручье ( $\text{CuOH}^+$  и  $\text{Cu}(\text{OH})_2^0 \sim 7\%$ ). Формы бария представлены аква-ионами  $\text{Ba}^{2+}$  (41 %) и сульфатными комплексами  $\text{BaSO}_4^0$  (58 %). В долевом распределении форм Cd, Zn и Mn преобладают свободнионные комплексы, сульфатные и гидрокарбонатные комплексы.

Другая картина наблюдается в кислом Зеленом ручье – до 50 % металлов здесь мигрируют в незакомплексованных формах. Остальная часть представлена связанными, преимущественно сульфатными ионами: нейтральными  $\text{CuSO}_4^0(\text{aq})$  и  $\text{ZnSO}_4^0(\text{aq})$  и заряженными  $\text{AlSO}_4^+$ ,  $\text{AlSO}_4^{2-}$ ,  $\text{Zn}(\text{SO}_4)_2^{2-}$ . Лишь у кадмия и железа (III) дополнительно образуются хлоридные  $\text{CdCl}^+$  и гидроксидные  $\text{FeOH}_2^+$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{4+}$ ,  $\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{3+}$  комплексы.

В зоне смешения этих двух ручьев наблюдается переход Fe(III) в свободнионные и сульфатные комплексы Fe(II). У элементов Al, Ba, Cd преобладающей химической формой становятся сульфатные комплексы. Гидрокарбонатные комплексы появляются у Cu и Zn, однако доля сульфатных и акваионных форм все же больше.

Проследим изменение долевого распределения форм тяжелых металлов вниз по течению реки Блявы до р. Курган (точка 250). Здесь рассматривались две крупные зоны смешения: слияние р. Херсонка с р. Блява (точки 117, 119) и большая общая зона смешения р. Блява и р. Жирикля (точки 279, 281). Для Zn характерно увеличение доли аква-ионов, повышение доли сульфатных форм и уменьшение доли гидрокарбонатных комплексов до слияния с р. Жирикля. Затем наблюдается снижение доли сульфатных комплексов и увеличение гидрокарбонатных. Для железа (III) и алюминия характерны различные гидроксидные комплексы на всем протяжении реки. Химические формы кадмия представлены главным образом аква-ионами, лишь увеличение доли сульфатных комплексов (44 %) на участке, проходящем через зону Медногорского медно-серного комбината (точка 279), меняют их долевое распределение вниз по течению до 50 %.

На всем протяжении реки преобладающими химическими формами свинца являются нейтральные карбонатные комплексы, которые незначительно снижаются при впадении высокосульфатных вод р. Жирикля, образуя сульфатные комплексы и аква-ионы. Для никеля основная доля химических форм приходится на нейтральные карбонатные, однако после слияния с р. Жирикля появляются аква-ионы и сульфатные комплексы. У меди преобладают гидрокарбонатные и гидроксидные комплексы и увеличивается доля аква-ионов (до 15 % в р. Курган). Основными химически-



ми формами бария являются аква-ионы ( $Ba^{2+}$ ), сульфатные ( $BaSO_4^{0_{aq}}$ ) и гидрокарбонатные ( $BaHCO_3^+$ ) комплексы с незначительной долей нейтральных карбонатных ( $BaCO_3^{0_{aq}}$ ). Вниз по течению долевое распределение форм сильно не меняется, но резко увеличивается доля сульфатных комплексов, а доля аква-ионов снижается. Нейтральные карбонатные комплексы практически не образуются.

#### Равновесие природных и техногенных вод с минеральными фазами

Термодинамические расчеты индексов насыщения подотвальных ручьев Блявинского рудника показали, что воды Голубого ручья пересыщены по отношению к ряду гидроксидных минералов алюминия – диаспору  $AlO(OH)$ , гиббситу  $Al(OH)_3$ , бёмиту  $AlO(OH)$ , и к гидроксидам железа в виде ферригидрита  $Fe(OH)_3$ . Раствор также близкоравновесен к гидроксидам марганца и аморфным гидросидам алюминия. Кроме того, раствор пересыщен к ряду глинистых минералов и силикатам (рис. 4).

В растворе также возможно образование частиц карбонатов  $Cu$ ,  $Mn$ ,  $Ca$ , и сульфатных минералов типа алунита, барита, брошантита, а также частиц алюмосиликатов.

В окислительной обстановке Зеленого ручья возможно формирование ярозита разного состава,

а также барита  $BaSO_4$ , алунита  $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ , урбанита  $Al_0HSO_4$ . В равновесии находятся гипс  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  и ангидрит  $CaSO_4$ . Из гидроксидов вероятно выпадение ферригидрита  $Fe(OH)_3$ , диаспора  $AlO(OH)$  (рис. 5).

В зоне смешения подотвальных ручьев наблюдается пересыщение по отношению к оксидам и гидроксидам  $Fe^{3+}$  (гётиту и маггемиту). Ферригидрит находится в близко равновесном состоянии с раствором. Индексы насыщения гидроксидов алюминия (диаспор, гиббсит и бёмит) варьируют от  $-0,74$  до  $-2,5$  (рис. 6), что говорит о том, что раствор недосыщен по отношению к этим минеральным фазам. Индексы насыщения в воде р. Жирикля для гидроксидов и оксидов  $Al$ ,  $Fe$ ,  $Cu$  колеблются от  $+3$  до  $-0,5$  (рис. 7). Близко равновесны воды по отношению к аморфному оксиду кремния и отавиту  $CdCO_3$ , магнезиту, кальциту и доломиту. В воде возможно уже образование взвешенных частиц силикатов  $ZnSiO_3$  ( $ИН=2,5$ ).

Термодинамические расчеты вод из р. Блявы перед впадением в нее р. Жирикля показали высокие индексы насыщения по ряду алюмосиликатных фаз. Так, в воде возможно образование взвешенных частиц  $ZnSiO_3$ , ломонтита  $CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 4H_2O$ , иллита  $K_{0,6}Mg_{0,25}Al_{2,3}Si_{3,5}O_{10}(OH)_2$ , галлуазита  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  и бейделлита  $(Na,K, \frac{1}{2}Mg)_{0,33}Al_{2,33}Si_{3,67}O_{10}(OH)_2$ .

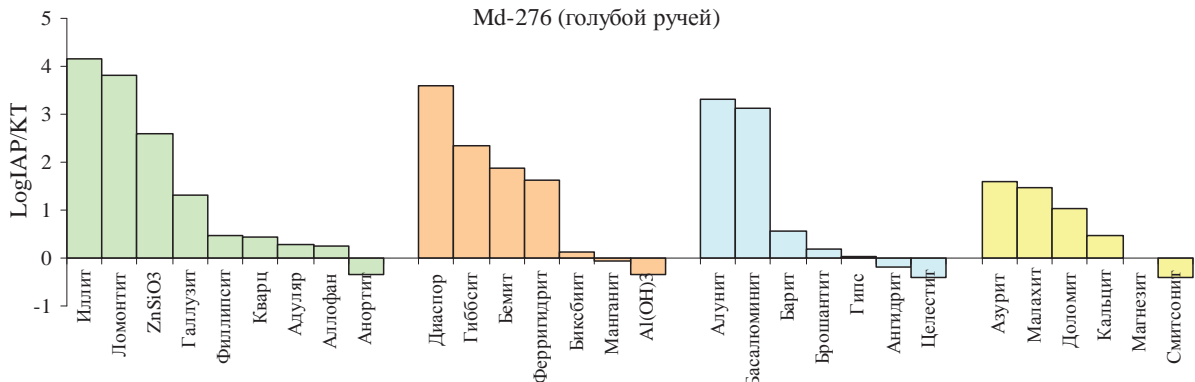


Рис. 4. Индексы насыщения минералов в Голубом ручье

Fig. 4. Saturation indices of minerals in the Goluboy stream

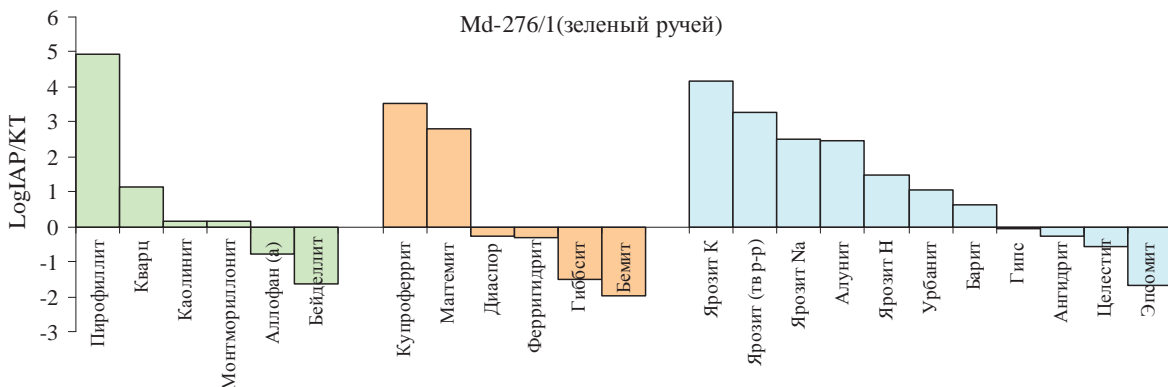


Рис. 5. Индексы насыщения минералов в Зеленом ручье

Fig. 5. Saturation indices of minerals in the Zeleny stream

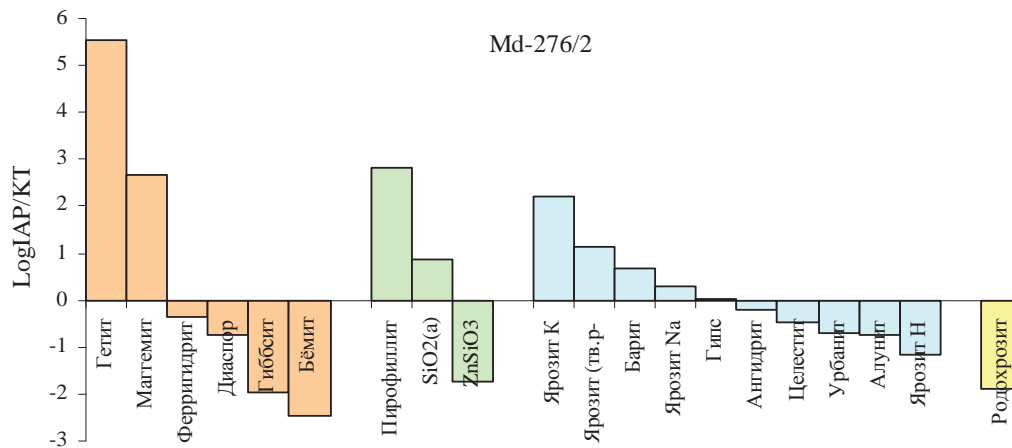


Рис. 6. Индексы насыщения минералов в зоне смешения Голубого и Зеленого ручьев

Fig. 6. Saturation indices of minerals in the mixing zone of Goluboy and Zeleny streams

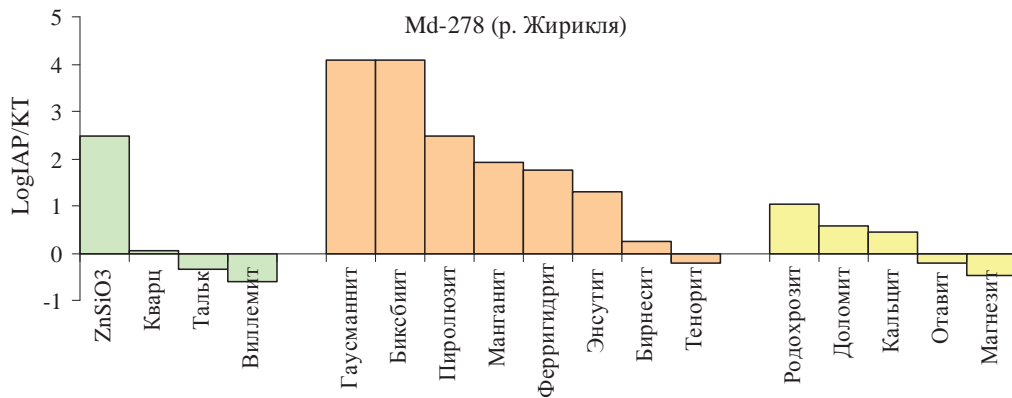


Рис. 7. Индексы насыщения минералов в р. Жирикля

Fig. 7. Saturation indices of minerals in the Zhiriklya River

Из гидроксидов пересыщение раствора наступает по отношению к диаспору, гибситу, бёмиту и ферригидриту. Из сульфатов возможно образование алуниита, базальюминита  $Al_4(OH)_{10}SO_4$  и барита. Карбонаты в данном случае находятся в недосыщенном состоянии (рис. 8).

Ниже по течению р. Блявы, после впадения р. Жирикля, индексы насыщения по отношению к ряду оксидов и гидроксидов железа и алюминия остаются, как и до впадения. Та же самая ситуация наблюдается и у сульфатных минералов (рис. 9).

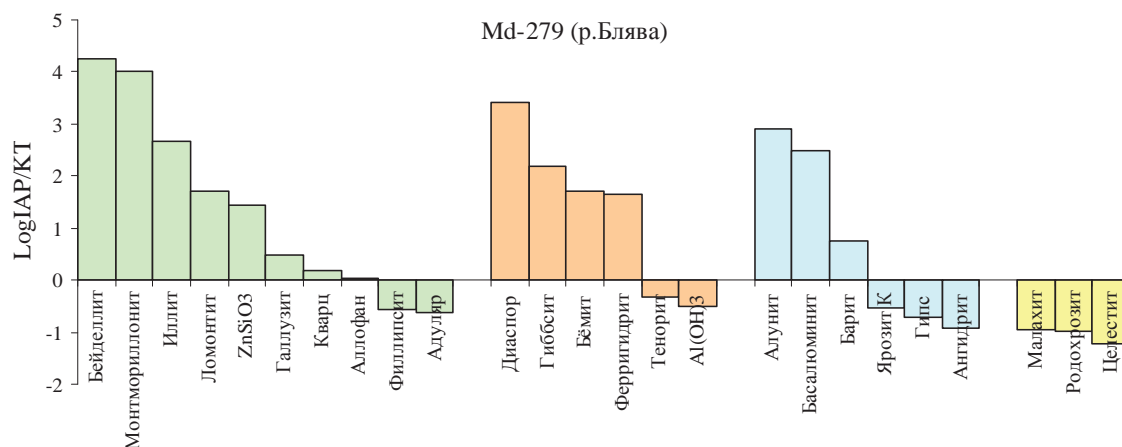


Рис. 8. Индексы насыщения минералов в воде р. Блява

Fig. 8. Saturation indices of minerals in the Blyava River

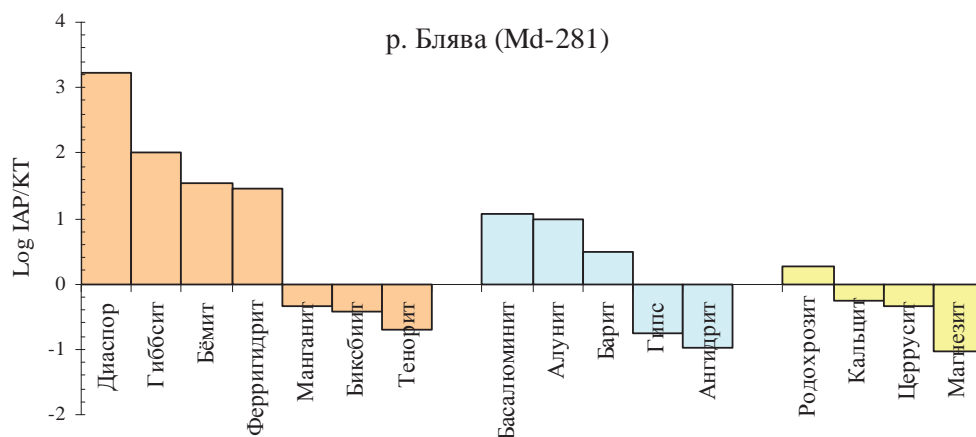


Рис. 9. Индексы насыщения минералов в воде р. Блява после впадения в р. Жирикля

Fig. 9. Saturation indices of minerals in the Blyava River after mixing with Zhiriklya River

Аномалии тяжелых металлов в воде протягиваются на большие расстояния от источника загрязнения с формированием наиболее контрастных ореолов Zn, Cd, Mn, Cu в нижнем течении р. Блява. Для Fe, Cu, Zn, Mn и Cd характерно увеличение концентрации в р. Курган, что связано с недостаточной природной буферизирующей способностью р. Блява. Объяснение обнаруженным фактам можно найти в корреляционных взаимосвязях между элементами. В водах Медногорской ГТС существует высокая корреляция между Al, Fe, Mn и тяжелыми металлами (Cd, Zn, Co, Cu, Pb, Ni). Как показало моделирование, Al, Fe, Mn образуют аморфные гидроксиды, которые могут находиться в виде тончайших коллоидов [23], способных мигрировать в водотоках в виде влекомой взвеси, сорбирующей на себе тяжелые металлы, такие как Cu, Pb и Zn, которая может мигрировать на длинные расстояния до того, как они перейдут в донный осадок [24]. Следует отметить, что параметр pH показал исключительно отрицательную корреляцию со всеми металлами, а электропроводность показала значимую – на уровне 99 % – положительную связь со всеми компонентами. Электропроводность и сульфат-ионы – более достоверные индикаторы антропогенной нагрузки, чем pH или тяжелые металлы. Сульфат-ион является более консервативным анионом в воде, меньше всего подвергаясь процессам сорбции или колебаниям pH, в отличие от тяжелых металлов [25]. Наличие коллоидов подтверждается индексами насыщения минералов, таких как гиб-

сит, базальюминит, уранит, бёмит в разных точках исследуемой системы. Действительно, в растворах возможно формирование различных гидроксидов и ярозита различного состава, которые неустойчивы при впадении их в р. Жирикля и способны растворяться. Полученные данные свидетельствуют о переходе гётита в ферригидрит в зонах смешения кислого и нейтрального техногенных ручьев и в реках Жирикля и Блява.

#### Заключение

Определение форм нахождения металлов и индексов насыщения минералов в растворе посредством модельных расчетов может объяснить и дать прогнозную оценку процессам, развивающимся в отвалах действующих и отработанных месторождений. В частности, нахождение металлов Zn и Cu в воде в виде акваионов позволяет предположить, что в данных условиях основным механизмом их осаждения будет сорбция на гидроокислах и/или глинистых минералах, а не формирование нерастворимых вторичных соединений. Образование взвеси минералов и фаз регулируется подвижными физико-химическими условиями и формами нахождения элементов в растворах. Система «минеральная фаза – раствор» в дренажных ручьях и зонах их влияния неустойчива, возможен легкий переход элементов из взвеси в раствор и обратно.

Работа была выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН IX.138.3.1 и при финансовой поддержке гранта фонда Президента РФ № МК-6654.2016.5

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dold B. Basic concepts in environmental geochemistry of sulphide mine waste management // Waste Management / Ed. by E.S. Kumar. – Rijeka: In Tech, 2010. – P. 173–198.
2. Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 57. – P. 17–34.
3. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 57. – P. 3–16.
4. Kirillov M.V., Bortnikova S.B., Gaskova O.L. Authigenic gold formation in the cyanidation tailings of gold–arsenopyrite–quartz ore of Komsomolsk deposit (Kuznetski Alatau, Russia) // Environmental Earth Sciences. – 2016. – V. 75. – № 13. – P. 1–11.
5. Favas P.J.C., Pratas J., Gomes M.E.P. Hydrochemistry of superficial waters in the Adoria mine area (Northern Portugal): environmental implications // Environmental Earth Sciences. – 2012. – V. 65. – P. 363–372.
6. Geochemistry of Trace Metals and Rare Earth Elements in Stream Water, Stream Sediments and Acid Mine Drainage from Darrehzar Copper Mine, Kerman, Iran / N. Soltani, F. Moore, B. Keshavarzi, R. Sharifi // Water Quality, Exposure and Health. – 2014. – V. 6. – № 3. – P. 97–114.
7. Kinetics and roles of solution and surface species of chalcopyrite dissolution at 650mV / Y. Li, G., Qian J. Li, A. Gerson // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2015. – V. 161. – P. 188–202.
8. Manders P., Godfrey L., Hobbs P. Acid Mine Drainage in South Africa // Briefing Note 2009/02. CSIR Natural Resources and the Environment: Pretoria. Council for Scientific Research (CSIR).
9. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data / V. Olenchenko, D. Kucher, S. Bortnikova, O. Gasrkova, A. Edelev, M. Gora // Russian Geology and Geophysics. – 2016. – V. 57. – № 4. – P. 617–628.
10. Yurkevich N.V., Saeva O.P., Karin Y.G. Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2015. – V. 97. – № 1. – P. 76–89.
11. Елпатьевский П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. – М.: Наука, 1993. – 253 с.
12. Лубкова Т.Н., Яблонская Д.А., Шестакова Т.В. Геохимические особенности состава поверхностных вод Находкинского медно-порфирирового рудного поля, Чукотка // Вода: Химия и Экология. – 2013. – № 12. – С. 29–34.
13. Шварцев С.Л. Внутренняя эволюция геологической системы вода-порода // Вестник РАН. – 2012. – Т. 82. – № 3. – С. 242–251.
14. Acid Mine Drainages from Abandoned Mines: Hydrochemistry, Environmental Impact, Resource Recovery, and Prevention of Pollution / P.J.C. Favas, S.K. Sarkar, D. Rakshit, P. Venkatchalam, M.N.V. Prasad // Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention / Eds. M.N.V. Prasad, K. Shih. – Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sydney; Tokyo: Elsevier – Academic Press, 2016. – P. 413–462.
15. Williams T., Smith B. Hydrochemical characterization of acute acid mine drainage at Iron Duke mine, Mazowe, Zimbabwe // Environmental Geology. – 2000. – V. 39. – № 3–4. – P. 272–278.
16. Geochemical behavior of an acid drainage system: the case of the Amarillo River, Famatina (La Rioja, Argentina) / K. Lecomte, S. Maza, G. Collo, A. Sarmiento, P. Depetris // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – V. 24. – № 2. – P. 1630–1647.
17. Geochemical characterization and heavy metal contamination of groundwater in Satluj River Basin / C. Singh et al. // Environmental Earth Sciences. – 2013. – V. 71. – № 1. – P. 201–216.
18. Jeong C. Mineral-water interaction and hydrogeochemistry in the Samkwang mine area, Korea // Geochemical Journal. – 2001. – V. 35. – № 1. – P. 1–12.
19. Korneeva T., Aminov P., Kucher D. Integrated Geophysical and Geochemical Methods for the Environmental Assessment of Active Smelter Operations and Abandoned Mines in Karabash, Ural Mountains, Russia // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2015. – V. 196. – P. 459–469.
20. Parbhakar-Fox A., Lottermoser B.G. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices // Minerals Engineering. – 2015. – V. 82. – P. 107–124.
21. Ball J., Nordstrom D. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters. – Menlow Park, Calif.: U.S. Geological Survey, 1991. – 188 p.
22. Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralised areas / W.H. Ficklin, G.S. Plumlee, K.S. Smith, J.B. McHugh // Water Rock interaction: Proc. 7 International Symposium / Eds. Y.K. Kharaka, A.S. Maest. – Park City, Utah, 1992. – P. 381–384.
23. Schemel L., Kimball B., Bencala K. Colloid formation and metal transport through two mixing zones affected by acid mine drainage near Silverton, Colorado // Applied Geochemistry. – 2000. – V. 15. – № 7. – P. 1003–1018.
24. Kimball B., Callender E., Axtmann E. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S.A. // Applied Geochemistry. – 1995. – V. 10. – № 3. – P. 285–306.
25. Gray N.F. Acid mine drainage composition and the implications for its impact on lotic systems // Wat. Res. – 1998. – V. 32. – № 7. – P. 2122–2134.

Поступила 07.02.2017 г.

## Информация об авторах

**Корнеева Т.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Юркевич Н.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геофизических систем физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета.

**Аминов П.Г.** кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории минералогии техногенеза и геоэкологии Института минералогии УрО РАН.

UDC 550.424:622.343.5:622'17

## GEOCHEMICAL FEATURES OF MIGRATION FLOWS IN THE IMPACT ZONE OF MINING TECHNOGENESIS (MEDNOGORSK)

**Tatyana V. Korneeva**<sup>1</sup>,  
korneevatv@ipgg.sbras.ru

**Nataliya V. Yurkevich**<sup>1,2</sup>,  
yurkevichnv@ipgg.sbras.ru

**Pavel G. Aminov**<sup>3</sup>,  
aminovp@mail.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
3, Koptug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University  
I-304, 20, K. Marx avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

<sup>3</sup> Institute of Mineralogy UB RAS,  
Ilmen Reserve Miass, 456317, Russia.

*The relevance of the research is caused by large-scale pollution of natural ponds and rivers which occurs at mine drainage, containing elevated concentration of metals, sulphates and other components, run into uncontaminated waters. Assessment of the degree of natural and technogenic waters balance to hydrogenic minerals is currently an urgent problem. Its solution allows describing the nature of the geochemical specifics of technogenic water, and the mechanisms of their formation, identifying the sources of chemical elements and processes of secondary mineral formation, forms of migration of toxic elements in the technogenic streams and their impact on the environment.*

**The aim of the study is finding-out the regularities of secondary mineral formation in anthropogenic streams as major factor of removal of metals from solutions.**

**The methods used in the study.** Physical and chemical modeling of chemical species in solution was calculated using WATEQ4f code. At the same time the authors have calculated saturation indexes, indicating a potential undersaturation or supersaturation of solution with respect to various mineral phases.

**The results.** The paper introduces the results of physico-chemical modeling of Mednogorsk geotechnical system with application of the WATEQ4f package. The authors calculated the chemical species of elements and saturation indexes with respect to a number of mineral phases. Various hydroxides and different types of jarosite, which are unstable in the mixing zone with Zhiriklya River and are able to dissolve, can be formed in water samples under study. These findings indicate the transition of goethite to ferrihydrite in the mixing zones of Zeleny and Goluboy mine drainages and in Zhiriklya and Blyava rivers.

### Key words:

Mine drainage, saturation index, chemical species, modeling, WATEQ4f, hydrochemistry, technogenic wastes.

### REFERENCES

- Dold B. Basic concepts in environmental geochemistry of sulphide mine waste management. *Waste Management*. Ed. by E.S. Kumar. Rijeka, In Tech, 2010. pp. 173–198.
- Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 17–34.
- Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 3–16.
- Kirillov M.V., Bortnikova S.B., Gaskova O.L. Authigenic gold formation in the cyanidation tailings of gold–arsenopyrite–quartz ore of Komsomolsk deposit (Kuznetski Alatau, Russia). *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, no. 13, pp. 1–11.
- Favas P.J.C., Pratas J., Gomes M.E.P. Hydrochemistry of superficial waters in the Adoria mine area (Northern Portugal): environmental implications. *Environmental Earth Sciences*, 2012, vol. 65, pp. 363–372.
- Soltani N., Moore F., Keshavarzi B., Sharifi R. Geochemistry of Trace Metals and Rare Earth Elements in Stream Water, Stream Sediments and Acid Mine Drainage from Darrehzar Copper Mine, Kerman, Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 97–114.
- Li Y., Qian G., Li J., Gerson A. Kinetics and roles of solution and surface species of chalcopyrite dissolution at 650mV. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, vol. 161, pp. 188–202.
- Manders P., Godfrey L., Hobbs P. Acid Mine Drainage in South Africa. Briefing Note 2009/02. *CSIR Natural Resources and the Environment: Pretoria*. Council for Scientific Research (CSIR).
- Olenchenko V., Kucher D., Bortnikova S., Gasrkova O., Edelev A., Gora M. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 4, pp. 617–628.
- Yurkevich N.V., Saeva O.P., Karin Y.G. Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2015, vol. 97, no. 1, pp. 76–89.
- Elpatevskiy P.V. *Geokhimiya migratsionnykh potokov v prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh geosistemakh* [Geochemistry of migration flows in natural and natural-anthropogenic geosystems]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 253 p.
- Lubkova T.N., Yablonskaya D.A., Shestakova T.V. Geokhimiicheskie osobennosti sostava poverkhnostnykh vod Nakhodkinskogo medno-porfirovogo rudnogo polya, Chukotka [Geochemical

- peculiarities of surface water composition of the Nakhodka porphyry copper ore field J. *Water: Chemistry and Ecology*, 2013, no. 12, pp. 29–34.
13. Shvartsev S.L. Vnutrennyaya evolyutsiya geologicheskoy sistemy voda–poroda [Internal evolution of the geological system water–rock]. *Bulletin of the RAS*, 2012, vol. 82, no. 3, pp. 242–251.
  14. Favas P.J.C., Sarkar S.K., Rakshit D., Venkatachalam P., Prasad M.N.V. Acid Mine Drainages From Abandoned Mines: Hydrochemistry, Environmental Impact, Resource Recovery, and Prevention of Pollution. *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention*. Eds. M.N.V Prasad, K. Shih. Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sydney; Tokyo, Elsevier – Academic Press, 2016. pp. 413–462.
  15. Williams T., Smith B. Hydrochemical characterization of acute acid mine drainage at Iron Duke mine, Mazowe, Zimbabwe. *Environmental Geology*, 2000, vol. 39, no. 3–4, pp. 272–278.
  16. Lecomte K., Maza S., Collo G., Sarmiento A., Depetris P. Geochemical behavior of an acid drainage system: the case of the Amarillo River, Famatina (La Rioja, Argentina). *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 1630–1647.
  17. Singh C., Rina K., Singh R., Mukherjee S. Geochemical characterization and heavy metal contamination of groundwater in Satluj River Basin. *Environmental Earth Sciences*, 2013, vol. 71, no. 1, pp. 201–216.
  18. Jeong C. Mineral-water interaction and hydrogeochemistry in the Samkwang mine area, Korea. *Geochemical Journal*, 2001, vol. 35, no. 1, pp. 1–12.
  19. Korneeva T., Aminov P., Kucher D. Integrated Geophysical and Geochemical Methods for the Environmental Assessment of Active Smelter Operations and Abandoned Mines in Karabash, Ural Mountains, Russia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2015, vol. 196, pp. 459–469.
  20. Parbhakar-Fox A., Lottermoser B.G. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*, 2015, vol. 82, pp. 107–124.
  21. Ball J., Nordstrom D. *User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters*. Menlow Park, Calif, U.S. Geological Survey, 1991. 188 p.
  22. Ficklin W.H., Plumlee G.S., Smith K.S., McHugh J.B. Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralised areas. *Proc. 7th International Symposium. Water Rock interaction*. Eds. Y.K. Kharaka, A.S. Maest. Park City, Utah, 1992. pp. 381–384.
  23. Schemel L., Kimball B., Bencala K. Colloid formation and metal transport through two mixing zones affected by acid mine drainage near Silverton, Colorado. *Applied Geochemistry*, 2000, vol. 15, no. 7, pp. 1003–1018.
  24. Kimball B., Callender E., Axtmann E. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S.A. *Applied Geochemistry*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 285–306.
  25. Gray N.F. Acid mine drainage composition and the implications for its impact on lotic systems. *Wat. Res.*, 1998, vol. 32, no. 7, pp. 2122–2134.

Received: 7 February 2017.

#### Information about the authors

**Tatyana V. Korneeva**, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Nataliya V. Yurkevich**, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; assistant professor, Novosibirsk State Technical University.

**Pavel G. Aminov**, Cand. Sc., researcher, Institute of Mineralogy UB RAS.

УДК 622.24.053

## КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ АЛЮМИНИЕВЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Шакирова Алина Ильдаровна<sup>1</sup>,  
Shakirova\_ali@mail.ru

Исмаков Рустэм Адипович<sup>1</sup>,  
ismakovrustem@gmail.com

Аглиуллин Ахтям Халимович<sup>1</sup>,  
dir@oooptm.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность работы обусловлена необходимостью в использовании высококачественных материалов бурильного инструмента для поиска трудноизвлекаемых углеводородов Крайнего Севера и освоения арктического шельфа.

**Цель работы:** совершенствование свойств материала легкосплавных бурильных труб (ЛБТ), основанное на результатах комплексного изучения серии образцов алюминиевых сплавов, включая их триботехнические испытания на машинах трения.

**Методы исследования:** анализ процесса изнашивания: образцов ЛБТ в контакте со стальной (45 группы прочности «D») обсадной колонной с использованием машины трения УМТ 2168 в среде промывочной жидкости и на тестере Fann; образцов ЛБТ в контакте «металл – горная порода» в среде промывочной жидкости на машине трения АИ-ЗМ; тестирование образцов легкосплавных бурильных труб в системе «обсадная колонна – бурильная труба» в среде промывочной жидкости на машине трения ИИ-5018.

**Результаты.** Показано, что методы, базирующиеся на установках УМТ-2168, ИИ-5018, АИ-ЗМ и тестере Fann, позволяют моделировать процесс трения бурильных труб, изготовленных из легкого сплава, обеспечивая физическое подобие процесса трения пары «бурильная труба – обсадная колонна», «бурильная труба – горная порода» в среде различных буровых промывочных жидкостей. Проанализировано влияние применяемых в бурении растворов с полимерными и смазочными добавками на показатели триботехнических свойств различных буровых промывочных жидкостей применительно к паре трения «металл – горная порода». Рекомендовано применение методов интенсивной деформации, в частности равноканально-углового прессования, для получения ультрамелкозернистой структуры в алюминиевых сплавах с заданными физико-механическими свойствами, необходимых для улучшения триботехнических свойств и увеличения срока службы бурильных труб.

### Ключевые слова:

Бурильная колонна, легкосплавные бурильные трубы, метод РКУП, запас прочности, скважина с большой протяженностью горизонтального участка.

### Введение

За последние годы объём проходки в горизонтальном бурении вырос на 70 %, что явилось основным драйвером роста рынка бурения, а также всего комплекса связанных с ним услуг. Выросла потребность в совершенствовании техники и технологии обеспечения безаварийного введения работ при бурении горизонтальных участков большой протяженности. Одной из важнейших составляющих бурильной колонны (БК) являются бурильные трубы, которые предназначены не только для промывки забоя и ствола скважины, доведения гидравлической мощности до забойного двигателя, но и для создания и доведения осевой нагрузки, вращающего момента до породоразрушающего инструмента. С учетом существующих технологических факторов, влияющих на искривление скважин, используются соответствующие компоновки БК, которые в процессе бурения испытывают различные типы нагрузок как в обсаженном, так и в открытом стволе. Как правило, из-за большей протяженности ствола, с БК возникают технико-технологические сложности, связанные с износом материала замков, тела труб, потерей устойчивости. Совершенствование компоновок со стальными бурильными трубами (СБТ) включает, особенно в по-

следние годы, применение комбинированных БК с использованием легкосплавных бурильных труб (ЛБТ) [1–5]. Последние позволяют не только снизить силы трения о стенки ствола при вращении и продольном продвижении БК в горизонтальном участке скважины, но и увеличить его протяженность, существенно повлиять на очистку ствола скважины от шлама. Таким образом, повышение эксплуатационных свойств ЛБТ на сегодняшнем этапе развития техники и технологии бурения является весьма актуальной задачей.

Целью настоящего исследования является совершенствование свойств материала ЛБТ, основанное на результатах комплексного изучения серии образцов алюминиевых сплавов (Al-Cu-Zr, 1420, 1421, 1460) [6], включая их триботехнические испытания [7].

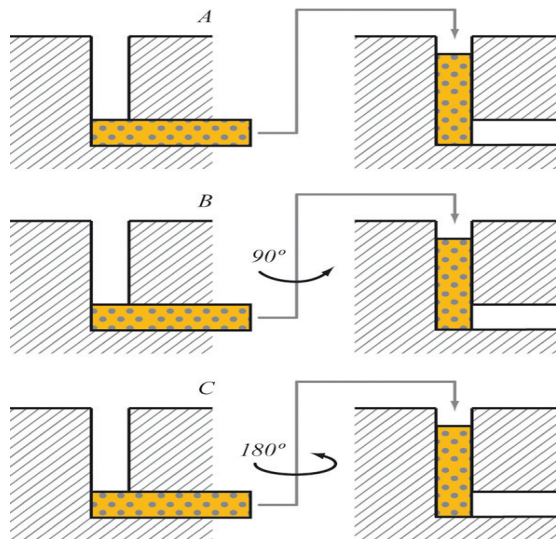
Исследования включают в себя лабораторные изучения:

- 1) изнашивания образцов ЛБТ в контакте со стальной (45 группы прочности «D») обсадной колонной на машине УМТ 2168 [8] в среде промывочной жидкости (буровая промывочная жидкость на водной основе, безглинистый буровой раствор, полимерный буровой раствор) на тестере Fann [9];

- 2) процесса изнашивания образцов ЛБТ в контакте «металл – горная порода» в среде промывочной жидкости на машине трения АИ-3М [10–12];
- 3) изнашивания легкосплавных бурильных труб в системе «обсадная колонна – бурильная труба» в среде промывочной жидкости на машине трения ИИ-5018 [13, 14].

Применительно к условиям бурения и эксплуатации скважин можно выделить два характерных случая вида контакта БК о стенки скважины: при вращении бурильных труб, при проведении спускоподъёмных операций (продольное перемещение) соответственно как в открытом, так и в обсаженном стволе. Испытуемые образцы ЛБТ были как стандартные, так и предварительно подвергнутые равноканальному угловому прессованию (далее – РКУП) – один из распространённых методов интенсивной пластической деформации [15–17]. Метод заключается в продавливании (экструзии) материала через наклонные по 90° каналы с одинаковой площадью поперечного сечения (рис. 1). Эту процедуру повторяли несколько раз.

Деформационное воздействие РКУП создаёт различные дефекты кристаллов сплава, изменяя при этом микроструктуру материала. В отличие от многих других способов деформационной обработки (например, наклёп, волочение) РКУП морфологически однородно уменьшает размер зёрен и изменяет их форму.



**Рис. 1.** Схематическое изображение модификаций РКУП: А – ориентация заготовки остается неизменной при каждом проходе; В – после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол 90°; С – после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол 180°

**Fig. 1.** Schematic image of modifications of equal channel angular pressing (ECAP): A – work piece orientation remains unchanged with each pass; B – after each pass the perform is rotated around its longitudinal axis at an angle of 90°; C – after each pass the perform is rotated around its longitudinal axis at an angle of 180°

Следует отметить, что в согласии с современными представлениями применяемые материалы можно условно разделить на три класса: ультрамелкозернистые (УМЗ), с размером зерен 1–10 мкм; субмикроструктурные (СМК), с размером зерен 0,1–1 мкм и нанокристаллические (НК), с размером зерен менее 100 нм. Такое разделение является обоснованным, поскольку физико-механические свойства УМЗ, СМК и НК материалов заметно различаются. Так, в сплавах с УМЗ структурой в определенных температурно-скоростных интервалах проявляется эффект структурной сверхпластичности, а уменьшение размера зерен до нанокристаллических величин в композитных и механически легированных сплавах приводит к явлению высокоскоростной сверхпластичности. В СМК и НК материалах продемонстрирована возможность получения высокопрочного состояния. В таких материалах изменяются даже такие структурно нечувствительные параметры, как температуры Кюри и Дебая, упругие модули, намагниченность насыщения и прочее. Уменьшение до субмикронного размера зерна обрабатываемых металлов и сплавов может приводить к значительному улучшению их механических свойств, в частности к повышению пределов прочности и текучести, а также к появлению способности к сверхпластическому деформированию [18–21].

Сформированная методом РКУП структура сплава 1420, наряду с особенностями его фазового состава, приводит к значительному повышению механических свойств этого материала. Так, величина микротвердости возрастает до 1260 МПа, а предел текучести при растяжении – до 280 МПа. Наблюдаемое многократное повышение механических свойств сплава 1420 после РКУП может быть обусловлено большими вкладами от твердорастворного и дисперсного упрочнения этого материала [22, 23]. В лабораторных исследованиях легких сплавов показано, что их износ зависит в значительной мере от обработки материала, от размера зерен и состояния границ зерен материала. Износ контртела при этом не учитывался в испытаниях.

#### Исследование изнашивания образцов ЛБТ в контакте с обсадной колонной на машине УМТ 2168 и Fann

С учетом сопоставления данных с критериями подобия и шероховатости поверхности с показателем  $R_z80$  (где  $R_z$  – высота неровностей профиля по 10 точкам, 80 мкм) тестер смазочных свойств фирмы «FANN» модели 212 и машина трения УМТ-2168 позволяют осуществить приближенное моделирование процесса изнашивания в системе «бурильная труба – обсадная колонна» в определенном диапазоне режимов взаимодействия по энергетическим показателям. Для проведения лабораторных экспериментальных исследований выбран тестер смазочных свойств фирмы «FANN» модели 212 и машина трения УМТ-2168, предназначенные для измерения коэффициента трения и оцен-



ки скорости изнашивания пары трения «металл–металл» в определенных промывочных жидкостях.

В ходе исследований на установках тестер смазочных свойств фирмы «FANN» модели 212 и машине трения УМТ 2168 были получены значения коэффициента трения ( $\varphi$ ) и скорости изнашивания ( $a$ , мм/ч) «сплав 1420 (до и после обработки) – сталь 45» в промывочных жидкостях, соответствующих реальным условиям бурения. Значение силы трения между образцами в ходе опыта регистрирует тензодатчик, сигнал с которого обрабатывается на АЦП и регистрируется на компьютере.

Средой для проведения опытов являлись следующие составы [24, 25]:

- 1) буровая промывочная жидкость (БПЖ) – техническая вода;
- 2) буровой безглинистый раствор (ББР) (Вода + 0,5 % Duovis + 0,3 % Aqua PAC LV + 0,1 % NaOH + 20 % Мел);
- 3) полимерный глинистый раствор (ПГР) (Вода + 4 % Бентонит + 0,2 % ЧГПАА + 0,3 % ПАМ + 0,1 % NaOH).

В соответствии с полученными результатами лабораторных исследований были построены диаграммы зависимости скорости изнашивания и коэффициента трения «сплав 1420 – сталь 45» в различных средах (рис. 2, 3).

Из приведенных ниже диаграмм можно сделать вывод о том, что при использовании методов

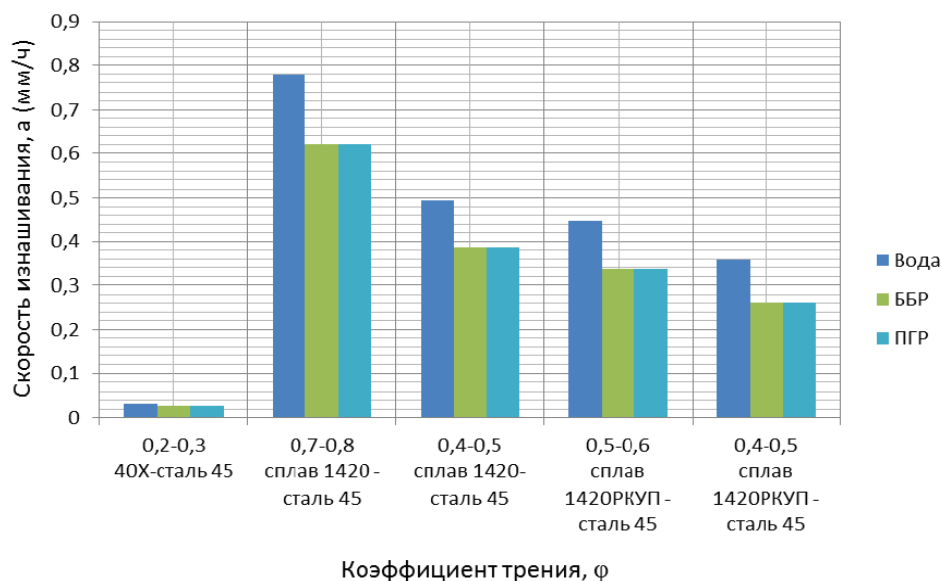


Рис. 2. Диаграмма зависимости коэффициента трения от значения скорости изнашивания «сплав 1420 – сталь 45» на УМТ 2168

Fig. 2. Diagram of dependence of friction coefficient on the alloy wear rate value «alloy 1420 – steel 45» in UMT 2168

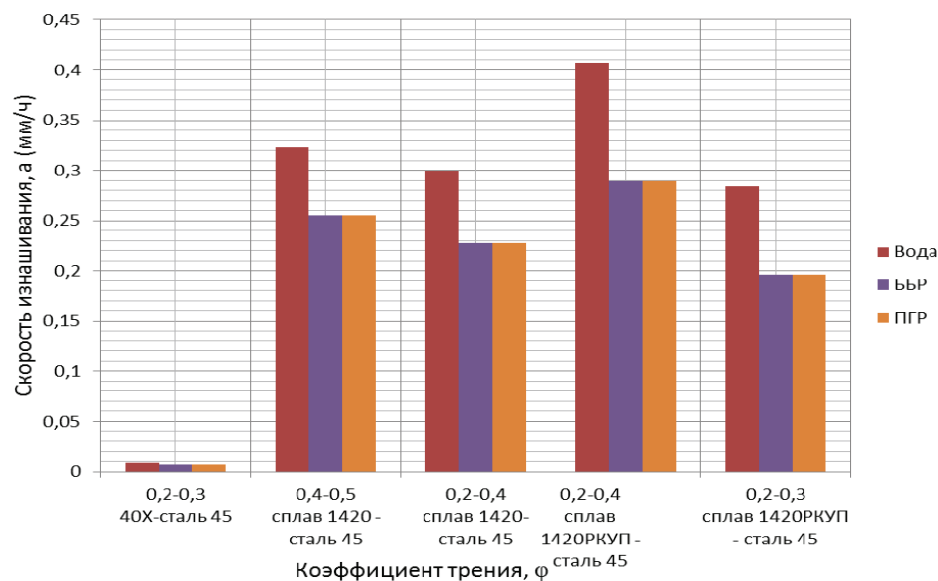


Рис. 3. Диаграмма зависимости коэффициента трения от значения скорости изнашивания «сплав 1420 – сталь 45» на FANN 212

Fig. 3. Diagram of dependence of friction coefficient on the alloy wear rate value «alloy 1420 – steel 45» in FANN 212

обработки равно-канального углового прессования и с учетом полимерных добавок значения коэффициента трения и скорости изнашивания уменьшаются. Метод РКУП позволяет увеличить износостойкость легкого сплава, применяющегося для изготовления ЛБТ, в полтора раза. Коэффициент трения в паре «металл – легкий сплав РКУП» на 15 % ниже, чем в паре «металл – легкий сплав».

#### Исследование процесса изнашивания ЛБТ в контакте «металл – горная порода» на машине трения АИ-3М

Для проведения эксперимента была выбрана установка АИ-3М, которая позволяет моделировать изнашивание замка легкосплавной бурильной трубы о стенку необсаженной части скважины.

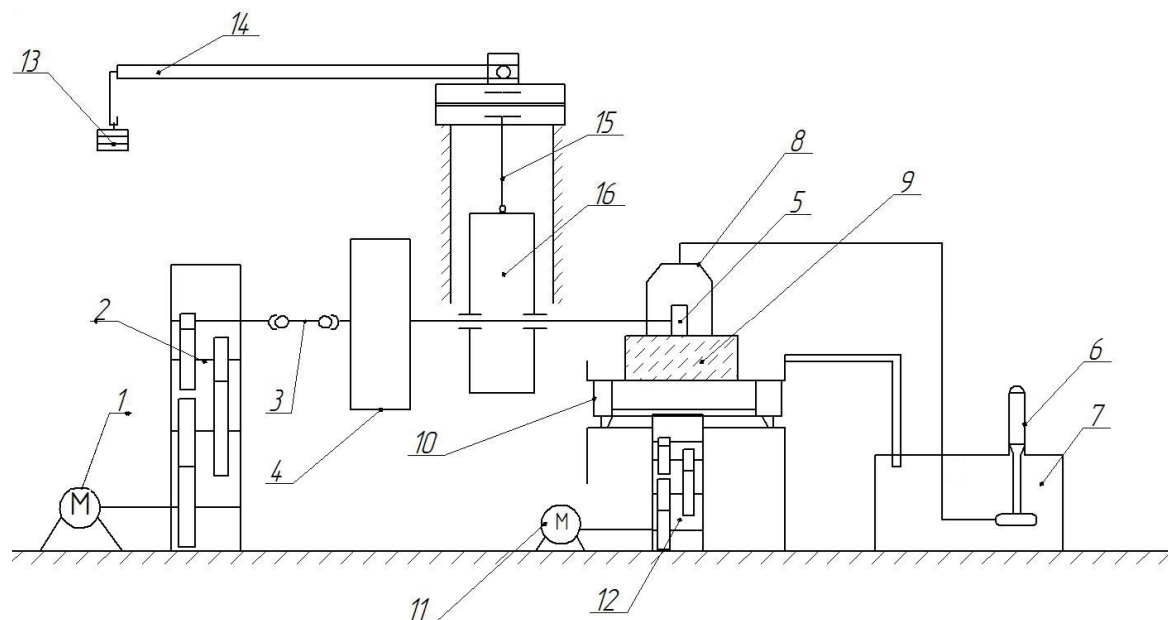
Данная установка является модификацией старой установки АИ-3, которая включает систему: подачи диска, подачи керна, подачи осевой нагрузки и подачи промывочной жидкости (рис. 4).

Перед началом опыта берется диск диаметром 30 мм, шириной 4 мм и горная порода с ровной поверхностью. Диск из образца сплава взвешивается на специальных весах. Далее, после крепления диска и горной породы на установке, начинается эксперимент. В ходе опыта также необходимо запустить циркуляционную систему с помощью насоса, тем самым имитируя процесс промывки скважины. После того как диск полностью проедется по горной породе, установка автоматически выключится. Далее диск снимается для повторно-

го взвешивания. Тензомер, который установлен на столе установки под горной породой, через специальный переходник, подключен к компьютеру, на котором с помощью программного обеспечения ZetLab необходимо следить за показателем силы трения. Также перед началом опытов необходимо провести тарировку осевой нагрузки и силы трения скольжения, чтобы можно было определить коэффициент трения. Далее по полученным в ходе исследования данным рассчитываем показатели скорости изнашивания диска и коэффициент трения [10–12].

В качестве растворов были взяты вода и ингибированный глинистый раствор (17 % бентонит + 0,2 % NaOH + 0,6 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 1 % КМЦ + 0,2 % НТФ + 4 % KCl + 75 % Мел), а в качестве смазочной добавки – 1 % СДБур (смазочная добавка, которая предназначена для обработки буровых растворов при бурении разведочных, эксплуатационных, наклонно-направленных, горизонтальных скважин).

Для определения износостойкости металлического диска из легкого алюминиевого сплава были проведены два эксперимента, каждый из которых включает в себя по несколько серий опытов. Опыты проводились регулированием осевой нагрузки по данным тарировки. С увеличением осевой нагрузки возможны появления стружек из материала диска, поэтому рекомендуется использовать защитные очки.



**Рис. 4.** Принципиальная схема установки АИ-3М: 1 – электродвигатель; 2 – силовой редуктор для изменения частоты вращения шпинделя; 3 – карданный вал; 4 – маховик; 5 – исследуемый на износ диск; 6 – центробежный насос; 7 – приемная емкость; 8 – специальная камера; 9 – керн горной породы; 10 – стол установки; 11 – электродвигатель; 12 – коробка передач для изменения скорости протяжки; 13 – съемный груз; 14 – рычаг; 15 – шток; 16 – ползун для передачи осевой нагрузки; 17 – измерительная система

**Fig. 4.** Schematic diagram of installation AI-3M: 1 is the electric motor; 2 is the power reducer for changing spindle speed; 3 is the cardan shaft; 4 is the flywheel; 5 is the wear disk for studying; 6 is the centrifugal pump; 7 is the receiving tank; 8 is the special camera; 9 is the core rock; 10 is the installation table; 11 is the electric motor; 12 is the gearbox to change the speed; 13 is the removable cargo; 14 is the lever arm; 15 is the stock; 16 is the slider for transmitting axial load; 17 is the measurement system

Как говорилось выше, опыт проводился с помощью установки АИ-ЗМ, которая включает в себя системы подачи диска, керна, осевой нагрузки и промывочной жидкости.

В первом эксперименте в качестве металла был применен сплав алюминий 1420 до РКУП, а в качестве горной породы – доломит. На рис. 5 приведены графики зависимости коэффициента трения в системе «металл – горная порода» от величины интенсивности нагрузки.

Из рис. 5 видно, что использование ингибированного глинистого раствора и смазочной добавки СДБур значительно снижает скорость изнашивания бурильного инструмента.

Во втором эксперименте в качестве металла был применен сплав алюминий 1420 после равноканально угловое прессование, а в качестве горной породы также – доломит. На рис. 6 приведены графики зависимости скорости изнашивания и коэффициента трения металла в системе «металл – горная порода» от величины интенсивности нагрузки.

Из рис. 5, 6 видно, что при использовании сплава алюминий 1420 после РКУП значительно снижается коэффициент трения и скорость изнашивания бурильного инструмента, по сравнению с использованием сплава алюминий 1420 до РКУП.

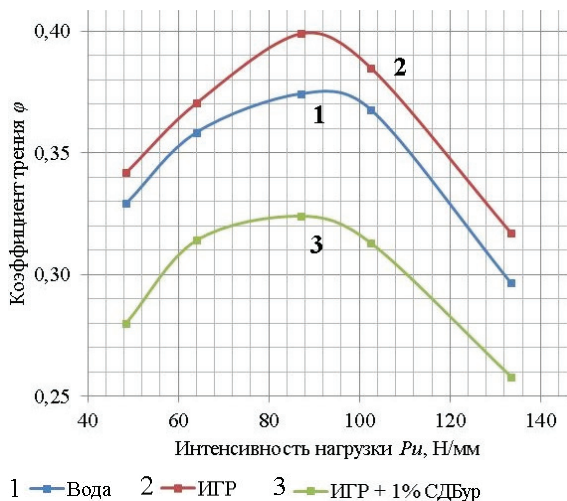


Рис. 5. График зависимости коэффициента трения от интенсивности нагрузки для сплава алюминий 1420 до РКУП при трении о доломит

Fig. 5. Graph of dependence of friction coefficient on load intensity for the aluminum alloy 1420 before ECAP when working over dolomite

Графически полученные результаты зависимости скорости изнашивания, коэффициента трения от интенсивности нагрузки, подаваемой на образец в различных средах, показали, что при использовании воды в качестве среды значение скорости изнашивания образца в 3 раза больше, чем в буровом растворе с применением ингибирующих добавок. Наилучшие результаты были получены при использовании в буровом растворе СДБур, значение скорости изнашивания образца которого в 3,5 раза меньше, чем в воде, и на 0,1 раз меньше, чем в ингибирующем глинистом растворе.

Благодаря обработке сплава РКУП улучшается износостойкость сплава на 20 %, а также другие важные параметры металлических сплавов.

Алюминиевый сплав 1420 очень редко применяется в бурении из-за своей низкой прочности. Однако меньший вес, доступность, дешевизна, а также использование РКУП в будущем открывает очень хорошие перспективы в бурении глубоких и сверхглубоких скважин.

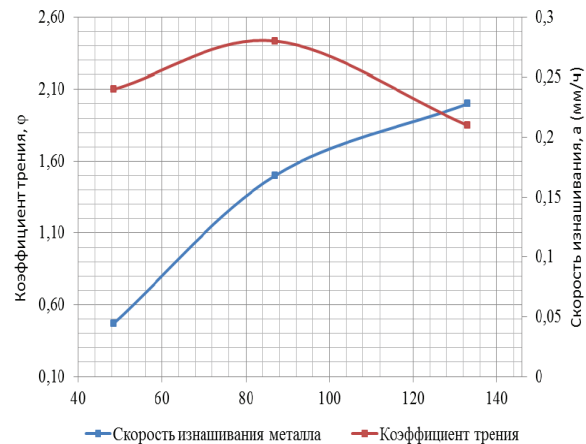


Рис. 6. График зависимостей скорости изнашивания и коэффициента трения металла от интенсивности нагрузки для сплава алюминий 1420 после РКУП при работе по доломиту

Fig. 6. Graph of dependence of alloy wear rate value on load intensity for the aluminum alloy 1420 after ECAP when working over dolomite

#### Исследование работы легкосплавных бурильных труб в системе «обсадная колонна – бурильная труба» на машине трения ИИ-5018

Для проведения эксперимента была выбрана установка ИИ-5018, которая позволяет моделировать процессы трения и износа металлов, сплавов и жестких конструкционных пластмасс об обсаженную часть ствола скважины. Установка ИИ-5018 включает систему: образец – контртело (схема «вкладыш–диск»), испытания со смазкой проводятся в специальной камере, машина устанавливается на виброопорах, специальный фундамент не требуется.

#### Задачи данного исследования:

- моделирование процесса бурения с легкосплавными бурильными трубами в обсаженной части ствола;
- подбор оптимальной промывочной жидкости с целью уменьшения износа образцов алюминиевых сплавов.

Средой для проведения опытов стали следующие составы:

- 1) полимерный глинистый раствор ПГР (вода + бентонит 3,5 % + мел 14 % + баразан 0,05 % + бактерицит 0,01 % + ПАЦ ЛВ 0,2 %);
- 2) безглинистый буровой раствор ББР (вода + 11 %  $\text{CaCO}_3$  + 0,4 % ПАЦНВ + 0,2 % ксантановая камедь + 0,1 бактерицид «Дарсан» + 0,1 % NaOH);
- 3) теплая вода pH=7.

Для структурообразования был использован бентонит, в качестве утяжелителя и кислотного коагулянта – мел.

Применение этих растворов было выбрано исходя из ряда их достоинств – относительно недороги и многофункциональны.

Вода и растворы были залиты в специальную камеру для уменьшения трения и износа пары «вкладыш–диск».

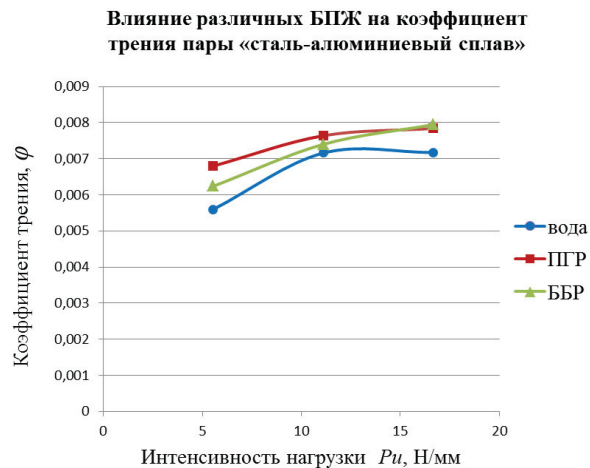


Рис. 7. График зависимости коэффициента трения металла от интенсивности нагрузки в различных промывочных средах

Fig. 7. Graph of dependence of metal friction coefficient on load intensity in various drilling fluids

На основе полученных результатов были построены зависимости нагрузки от скорости изнашивания, момента трения, из которых можно определить, что наименьшее изнашивание и трение металла происходит при применении полимерглинистого раствора. На рис. 7 представлены зависимости коэффициента трения металла от интенсивности нагрузки в различных промывочных средах. По результатам видно, что при применении полимерглинистого раствора износ и трение легкого сплава об обсадную колонну меньше, чем при

использовании в качестве среды воды и безглинистого бурового раствора.

### Выводы и рекомендации

Проведенные исследования показали, что методики, базирующиеся на установках УМТ-2168, ИИ-5018, АИ-3М и тестере Fann, позволяют моделировать процесс трения бурильных труб, изготовленных из легкого сплава, до и после обработки; обеспечивать физическое подобие процесса трения пары «бурильная труба – обсадная колонна», «бурильная труба – горная порода» в среде различных буровых промывочных жидкостей. Представлены следующие факторы, влияющие на повышение износостойкости и физико-механических свойств образцов алюминиевых сплавов:

1. Обработка образцов легкого сплава 1420 методом РКУП позволяет увеличить износостойкость в условиях работы БЖ в 1,5 раза. При этом коэффициент трения в паре «металл – легкий сплав» после РКУП на 15 % ниже, чем в паре «металл – стандартный легкий сплав».
2. Применение в бурении растворов с полимерными и смазочными добавками, которые оказывают влияние на показатели триботехнических свойств различных БЖ применительно к паре трения «металл – горная порода». Установлено, что при использовании воды в качестве промывочной жидкости скорость изнашивания образца ЛБТ 1420 до обработки в 3 раза больше, чем при применении полимерглинистого раствора и раствора с ингибирующими добавками. Значение скорости изнашивания образца ЛБТ 1420 после обработки на 0,5 раз меньше по сравнению с образцом до обработки. Установлено, что наилучшие результаты были получены при использовании в составе бурового раствора смазочной добавки СДБур. Значение скорости изнашивания сплава 1420 до обработки в этом растворе в 3,5 раза меньше, чем в воде, и в 0,5 раза меньше, чем в ингибированном глинистом растворе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иогансен К.В. Спутник буровика. Справочник. 3-е изд. – М.: Недра, 1990. – 303 с.
2. Эффективность применения легкосплавных бурильных труб ЛБТПН 90-9П при бурении боковых стволов малого диаметра в сложных геологотехнических условиях западно-сибирских нефтегазовых месторождений / А.А. Дворников, Р.Т. Ишкнин, В.С. Басович, И.Н. Буяновский // Бурение и нефть. – 2014. – № 11. – С. 56–59.
3. Басович В.С., Буяновский И.Н., Сапунжи В.В. Перспективы применения легкосплавных бурильных труб с наружным спиральным оребрением для бурения горизонтальных скважин и боковых стволов // Бурение и нефть. – 2014. – № 5. – С. 42–46.
4. Басович В.С., Буяновский И.Н., Петункин И.В. Перспективы применения алюминиевых бурильных труб при бурении горизонтальных скважин большой протяженности // Бурение и нефть. – 2015. – № 6. – С. 80–85.
5. Comprehensive Studies of Aluminium Drill pipe / V.S. Tikhonov, M.Ya. Gelfat, C. Cheatham, A. Adelman // IADC/SPE Drilling

Conference and Exhibition. – New Orleans, Louisiana, USA, 2–4 February 2010. – Paper Number 128328.

6. Гриценко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю. Механические свойства алюминиевых сплавов. Монография. – Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2012. – 196 с.
7. Смазочное действие сред в буровой технологии. Монография / Г.В. Конесев, М.Р. Мавлютов, А.И. Спивак, Р.А. Мулюков. – Уфа: Недра, 1993. – 272 с.
8. Паспорт ГБ2.779.026.ПС. Машина для испытания материалов на трение 2168 УМТ. Методы испытаний. Госстандарт России. URL: <http://www.rosoil.ru/tests.html> (дата обращения: 20.01.2017).
9. Паспорт № 206905. Model 212 EP/Lubricity Tester. User Manual. Rev E. Houston, Texas, U.S.A. – 2009. – 37 p. URL: <http://www.fann.com/public1/pubsdata/Manuals/Model%20212%20EP%20Lubricity%20Tester.pdf> (дата обращения: 20.01.2017).
10. Яхин А.Р. Улучшение триботехнических свойств буровых промывочных жидкостей применением добавок комплексного действия: дис. ... канд. наук. – Уфа, 2015. – 172 с.

11. Лазаренко А.В., Яхин А.Р., Янгиров Ф.Н. Совершенствование методики износа бурильного инструмента // 64-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. Сборник материалов конференции. – Уфа, 2013. – С. 252–253.
12. Аглиуллин А.Х., Яхин А.Р. Изучение триботехнических свойств промывочных жидкостей применительно к паре трения «Буровой инструмент – стенка скважины». – Уфа: УГНТУ, 2014. – 13 с.
13. ГОСТ 27640–88. Материалы конструкционные смазочные. – М.: Изд-во стандартов, – 1988. – 22 с.
14. Аль-сухили М.Х., Исмаков Р.А., Янгиров Ф.Н. Совершенствование методики изучения триботехнических аспектов работы силовой секции винтовых забойных двигателей // Территория нефтегаз. – 2014. – № 8. – С. 24–31.
15. Способ подготовки структуры алюминиевых сплавов: а.с. СССР № 1693114 А1; заявл. 16.08.89; опубл. 22.07.91, Бюл. № С 22F 1/057. – 3 с.
16. Tsenev N.K. Grain Boundaries Structure and Mechanical properties of Aluminium Alloys // Intergranular and Interphase Boundaries in Materials. – 1996. – P. 2. – V. 207–209. – P. 841–844.
17. Characteristics of superplasticity in an ultrafine-grained aluminum alloy processed by ECA pressing / R.K. Islamgaliev, N.F. Yunusova, R.Z. Valiev, N.K. Tsenev, V.N. Perevezentsev, T.G. Langdon // Scripta materialia. – 2003. – № 49. – P. 467–472.
18. Сверхмелкозернистые материалы и перспективы их использования в горном деле и трубопроводном транспорте / А.М. Шаммазов, Н.К. Цевев, Х.И. Акчурин, М.Н. Назарова, Р.А. Исмаков, С.П. Лебедич, В.Д. Суханов, Б.А. Чудинов, М.М. Криштал // Горный вестник. – 2000. – С. 33–36.
19. Valiev R.Z., Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. Plastic Deformation of Alloys with Submicron-grained Structure // Mat. Sci. & Eng. – 1991. – A 137. – P. 35–40.
20. Production of Ultrafine-Grained Metallic Materials Using an Intense Plastic Straining Technique / M. Furukawa, P.B. Berbon, Z. Horita, M. Nemoto, N.K. Tsenev, R. Valiev, T.G. Langdon // Materials Science Forum. Volume: Towards Innovation in Superplasticity. – Switzerland, 2015. – P. 177–185.
21. Developing superplastic properties in an aluminum alloy through severe plastic deformation / S. Lee, P.B. Berbon, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, N.K. Tsenev, R.Z. Valiev, T.G. Langdon // Materials Science and Engineering. – 1999. – A272. – P. 63–72.
22. Optimizing the Processing of a Commercial Al-based Alloy for High Strain Rate Superplasticity / P.B. Berbon, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, N.K. Tsenev, R.Z. Valiev, T.G. Langdon // Microstructure, Micromechanics and Processing of Superplastic Materials / Eds. T. Aizawa, K. Higashi, M. Tokuda. – Tsu, Japan: Mie University 1997. – P. 81–88.
23. Tsenev N.K., Shammazov A.M. Structural changes during grain boundaries migration of submicrometer – grained alloy Al-3 % Mg // 3rd Int. Conf. on Grain Growth ICGG-3: Grain Growth in Polycrystalline materials III / Eds. H. Weiland, B.L. Adams, A.D. Rollet. – TMS, Warrendale, PA, 1998. – P. 485–490.
24. Состав для защиты металлов от коррозии в минерализованных сероводородсодержащих водных средах: пат. Рос. Федерация № 2176257; заявл. 01.06.99; опубл. 27.11.01, Бюл. № 7С 23F 11/10 В. – 2 с.
25. Улучшение антикоррозионных свойств буровых промывочных жидкостей / Г.В. Рахматуллина, Г.В. Конесев, Р.А. Исмаков, В.Р. Рахматуллин, Л.Х. Асфандиаров, И.Р. Нигматуллин, В.П. Пурин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 226–231.

Поступила 30.01.2016 г.

#### Информация об авторах

**Шакирова А.И.**, аспирант кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Исмаков Р.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, проректор по научной и инновационной работе Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Аглиуллин А.Х.**, доктор технических наук, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.24.053

## COMPREHENSIVE STUDIES OF ALUMINUM DRILL PIPE MATERIALS

Alina I. Shakirova<sup>1</sup>,  
Shakirova\_ali@mail.ru

Rustem A. Ismakov<sup>1</sup>,  
ismakovrustem@gmail.com

Akhtyam Kh. Agliullin<sup>1</sup>,  
dir@oooptm.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technical University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Republic of Bashkortostan, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to use high quality material of drilling and rock cutting tool for developing remote regions of the Far North and Arctic offshore.

**The main aim** of the study is the enhancement of Light Alloy Drill Pipe material properties based on the results of the comprehensive studies of the aluminum alloy samples series, including its tribological tests on friction machines.

**The methods used in the research:** study of light alloy drill pipe specimens wear in contact with the steel casing (45 D group) on the friction machine UMT 2168 and tester FANN in fluid medium; work-study of light alloy drill pipe specimens in contact «metal–rock» on the friction machine AI-3M in fluid medium; work-study of light alloy drill pipe specimens in «casing – drill pipe» system on the friction machine II-5018 in fluid medium.

**The results.** The paper demonstrates that the methods based on machines UMT-2168, II-5018, AI-3M and tester FANN allow simulating friction process of drill pipe made of light alloy providing physical similarity of tribological process of «drill pipe – casing», «drill pipe – rock» pairs in various drilling fluids. The authors have studied the effect of the applied drilling fluids with lubricants and polymeric additives on performance of tribological drilling fluids properties in relation to the friction pair «metal–rock». It is recommended to apply the severe deformation technique, in particular the equal channel angular pressing, to obtain ultra-fine grain structure in aluminum alloys with the given physical and mechanical properties required to improve the tribotechnical features and increase of operating life of drill pipes.

**Key words:**

Drill string, light alloy drill pipe, equal-channel angular pressing (ECAP), margin of safety, horizontal well.

## REFERENCES

- Iogansen K.V. *Sputnik burovika* [Driller satellite]. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ., 1990. 303 p.
- Dvornikov A.A., Ishkin R.T., Basovich V.S., Buyanovskiy I.N. Effectiveness of application of light alloy drill pipes of improved dependability LAIDP 90-9P for drilling of slim side holes in complicated geological and technical conditions of West Siberian oil and gas fields. *Burenie i neft*, 2014, no. 11, pp. 56–59. In Rus.
- Basovich V.S., Buyanovskiy I.N., Sapunzhi V.V. Perspectives of applying light-alloy drill pipes with outer spiral flinning for drilling horizontal wells and offshoots (rat holes). *Burenie i neft*, 2014, no. 5, pp. 42–46. In Rus.
- Basovich V.S., Buyanovskiy I.N., Petunkin I.V. Prospects of applying aluminum drill pipe while drilling horizontal wells of great length. *Burenie i neft*, 2015, no. 6, pp. 80–85. In Rus.
- Tikhonov V.S., Gelfat M.Ya., Cheatham C., Adelman A. Comprehensive Studies of Aluminium Drill pipe. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, 2–4 February 2010. Paper Number 128328.
- Grishchenko N.A., Sidelnikov N.A., Gubanov I.Yu. *Mekhanicheskie svoystva alyuminievyykh splavov* [Mechanical properties of aluminum alloys]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Press, 2012. 196 p.
- Konesev G.V., Mavlyatov M.R., Spivak A.I., Mulyakov R.A. *Smazochnye deystviya sred v burovoy tekhnologii* [Lubricating effect in drilling fluids technology]. Ufa, Nedra Publ., 1993. 272 p.
- Machina dlya ispytaniya materialov na trenie* [Machine for testing materials in friction]. 2168 UMT GB2.779.026.PS. Available at: <http://www.rosoil.ru/tests.html> (accessed: 20 January 2017).
- Model 212 EP/Lubricity Tester. User Manual*. Part No. 206905 Rev E. 2009. Available at: <http://www.fann.com/public1/pub->
- [sdata/Manuals/Model%20212 %20EP%20Lubricity%20Tester.pdf](http://www.fann.com/public1/pub-sdata/Manuals/Model%20212%20EP%20Lubricity%20Tester.pdf) (accessed: 20 January 2017).
- Yakhin A.R. *Uluchshenie tribotekhnicheskikh svoystv burovyykh promyvochnyykh zhidkostey primeneniem dobavok kompleksnogo deystviya*. Dis. Kand. nauk [Improvement of tribological properties of drilling fluids applying complex action additives. Cand. Diss.]. Ufa, 2015. 172 p.
- Lazarenko A.V., Yakhin A.R., Yangirov F.N. Sovershenstvovanie metodiki iznosa burilnogo instrumenta [Improving the methods of drilling tool wear]. *64 nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenyykh UGNTU* [Proc. 64<sup>th</sup> scientific technical conference of students, postgraduates and young scientists USPTU]. Ufa, 2013. pp. 252–253.
- Agliullin A.Kh., Yakhin A.R. *Izuchenie tribotekhnicheskikh svoystv promyvochnyykh zhidkostey priminitelno k pare treniya «Burovoy instrument – stenka skvazhiny»* [Study of tribological properties of drilling fluids as applied to a friction pair «Drilling tool – borehole wall»]. Ufa, UGNTU Press, 2014. 13 p.
- GOST 27640–88. Materialy konstruksionnye i smazochye* [State Standard 27640–88. Structural lubricants]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1988. 22 p.
- Al-sukhili M. Kh., Ismakov R.A., Yangirov F.N. Sovershenstvovanie metodiki izucheniya tribotekhnicheskikh aspektov raboty silovoy sektsii vintovykh zaboinykh dvigateley [Improving the methodology for studying the tribological aspects of power section of downhole drilling motor]. *Territoria neftegaz*, 2014, no. 8, pp. 24–31.
- Abdulov R.Z., Valiev R.Z., Kopulov V.I., Malyshev V.F., Musalimov R.Sh., Tsenev N.K. *Sposoby podgotovki struktury alyuminievyykh splavov* [Methods of preparing the structure of aluminium alloys]. Patent RF, no 1693114, 1989.

16. Tsenev N.K. Grain Boundaries Structure and Mechanical properties of Aluminium Alloys. *Intergranular and Interphase Boundaries in Materials*, 1996, P. 2, vol. 207–209, pp. 841–844.
17. Islamgaliev R.K., Yunusova N.F., Valiev R.Z., Tsenev N.K., Pezevzentsev V.N., Langdon T.G. Characteristics of superplasticity in an ultrafine-grained aluminum alloy processed by ECA pressing. *Scripta materialia*, 2003, no. 49, pp. 467–472.
18. Shamazov A.I., Tsenev N.K., Akchurin Kh. I., Nazarova M.N., Ismakov R.A., Lebedich S.P., Sukhanov V.D., Chudinov B.A., Krishtal M.M. Sverkhmelkozernistye materialy i perspektivy ikh ispolzovaniya v gornom dele i truboprovodnom transporte [Over fine-grained materials and prospects for their use in mining and pipeline transport]. *Gorny vestnik*, 2000, pp. 33–36.
19. Valiev R.Z., Krasilnikov N.A., Tsenev N.K. Plastic Deformation of Alloys with Submicron-grained Structure. *Mat. Sci. & Eng.*, 1991, A 137, pp. 35–40.
20. Furukawa M., Berbon P.B., Horita Z., Nemoto M., Tsenev N.K., Valiev R., Langdon T.G. Production of Ultrafine-Grained Metallic Materials Using an Intense Plastic Straining Technique. *Materials Science Forum. Volume: Towards Innovation in Superplasticity*. Switzerland, 2015. pp. 177–185.
21. Lee S., Berbon P.B., Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Tsenev N.K., Valiev R.Z., Langdon T.G. Developing superplastic properties in an aluminum alloy through severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering*, 1999, A272, pp. 63–72.
22. Berbon P.B., Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Tsenev N.K., Valiev R.Z., Langdon T.G. Optimizing the Processing of a Commercial Al-based Alloy for High Strain Rate Superplasticity. *Microrstructure, Micromechanics and Processing of Superplastic Materials*. Eds. T. Aizawa, K. Higashi, M. Tokuda. Tsu, Mie University, 1997. pp. 81–88.
23. Tsenev N.K., Shammazov A.M. Structural changes during grain boundaries migration of submicrometer – grained alloy Al-3 % Mg. *3rd Int. Conf. on Grain Growth ICGG-3: Grain Growth in Polycrystalline materials III*. Eds. H. Weiland, B.L. Adams, A.D. Rollet. TMS. Warrendale, PA, 1998. pp. 485–490.
24. Konesev G.V., Mulyukov R.A., Asfandiyarov L.Kh., Ivanov G.E., Gilmutdinov A.V., Kalimullin A.A., Akchurin Kh.I., Istomin N.N., Lishtakov A.I., Galyautdinov A.A., Shereshovets V.V., Dokichev V.A., Yunusov M.S., Sultanov R.M. *Sostav dlya zashchity metallov ot korrozii v mineralizovannykh serovodosoderzhashchikh vodnykh sredakh* [Composition for protecting metal from corrosion in aqueous hydrogen sulfide mineralized environments]. Patent RF no. 2176257, 1999.
25. Konesev G.V., Pakhmatullin G.V., Ismakov R.A., Pakhmatullin V.R., Asfandiyarov L.Kh., Nigmatullin I.R., Purin V.P. Improving anti-corrosion properties of drilling fluids. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*, 2013, no. 4, pp. 226–231. In Rus.

Received: 30 January 2016.

#### Information about the authors

**Alina I. Shakirova**, postgraduate student, Ufa State Petroleum Technical University.

**Rustem A. Ismakov**, Dr. Sc., professor, Vice-rector, Ufa State Petroleum Technical University.

**Akhlyam Kh. Agliullin**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

УДК 630\*6

## МЕТОД КАДАСТРОВОЙ ОЦЕНКИ ЛЕСНЫХ ЗЕМЕЛЬ С ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ В ВИДЕ ГЕОИНФОРМАЦИИ

Ковязин Василий Федорович<sup>1</sup>,  
vfkedr@mail.ru

Романчиков Алексей Юрьевич<sup>1</sup>,  
romanchicov@inbox.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2.

Актуальность работы обусловлена отсутствием утвержденного на государственном уровне единого метода кадастровой оценки лесных земель и значительными расхождениями в подходах к данному вопросу частных оценочных организаций. Это приводит к значительному расхождению в значениях удельных показателей кадастровой стоимости лесных земель в регионах, находящихся в одной и той же лесорастительной зоне.

**Цель исследования:** разработать метод кадастровой оценки лесных земель, который учитывает индивидуальные особенности таксационных выделов, текущий прирост древесины, был бы применим для всех субъектов федерации, основывался бы на учете всех доступных видов лесных ресурсов, заготовка которых возможна в регионе.

**Методы исследования.** Для расчета стоимости лесных земель использован метод дисконтирования денежных потоков от заготовки ресурсов. Для вывода зависимостей между таксационными показателями и продуктивностью лесных ресурсов применен регрессионный анализ. Для визуализации результатов и подтверждения их достоверности авторы прибегли к геоинформационному моделированию средствами MapInfo.

**Результаты.** Результатом работы является автоматизированная методика поведельного определения кадастровой стоимости лесных земель на основе таксационных описаний насаждений с учетом заготовки недревесной продукции леса. Ее применение позволяет получать значение удельных показателей кадастровой стоимости, по частоте появления соответствующее нормальному. По территориальному расположению выделы с высоким удельным показателем кадастровой стоимости приурочены к зонам с благоприятными лесорастительными условиями и продуктивными насаждениями. Методика апробирована на материалах таксационных описаний одного из участковых лесничеств Ленинградской области с учетом региональных особенностей.

### Ключевые слова:

Государственная кадастровая оценка, лесные земли, формула Фаустманна, удельный показатель кадастровой стоимости, геоинформационные системы.

### Актуальность и цель исследований

В последние десятилетия в России актуальной является проблема разработки методического обеспечения земельно-оценочных работ, в частности методик государственной кадастровой оценки, поскольку она необходима для расчета размеров платежей за землю и грамотного управления земельными ресурсами. Для земель лесного фонда она значительно отличается по сути и содержанию от оценки земель прочих категорий, поскольку их правовой статус в России является особым – они находятся только в государственной собственности и частным лицам предоставляются только в аренду или срочное пользование [1]. Вследствие этого, рынок земель лесного фонда отсутствует как таковой, что приводит к невозможности использования стандартных методов оценки.

Особенно важна проработка методики при оценке непосредственно лесных земель [2], поскольку невозможно найти объекты-аналоги [3], как это можно сделать, например, для лесной инфраструктуры, определив стоимость, исходя из результатов оценки подобных объектов на землях других категорий.

Ограниченность в объеме и подробности доступной для оценщика информации создают ряд дополнительных ограничений, которые также необходи-

мо учитывать. К примеру, затруднено определение затрат на лесозаготовки в регионе, средних цен на продукцию, запасов лесных ресурсов.

В России, где на территории земель лесного фонда активно ведется заготовка древесины и побочной продукции лесопользования, разработка месторождений ископаемых, размещение объектов транспортной и инженерной инфраструктуры, внимание к вопросу кадастровой оценки земель данной категории должно быть особенно пристальным.

В России при государственной кадастровой оценке лесных земель проводились попытки применить западный опыт экономической оценки недвижимости, созданный для условий частного владения лесными землями. В силу этого, данный подход не нашел применения [4, 5].

В настоящее время не существует единой методики, и лесные земли оценивают исходя из единого для субъекта федерации удельного показателя кадастровой стоимости (УПКС), который определяют частные оценочные организации на основании собственных методических подходов [6]. Эта величина представляет собой кадастровую стоимость единицы площади (гектар или квадратный метр) и позволяет сравнивать ценность различных земельных участков вне зависимости от их размеров.



Зачастую методики оценочных организаций несут в себе неточности. Например, УПКС в соседних субъектах федерации для схожих лесорастительных условий существенно различаются. Помимо этого, ценность лесных участков сводится к усредненному показателю на уровне субъекта федерации или районного лесничества, не обеспечивая какой-либо ценовой дифференциации, что сводит на нет эффективность использования кадастровой стоимости как инструмента для управления земельным фондом России [7].

Таким образом, в кадастровой оценке лесных земель имеется ряд проблем:

- 1) отсутствует единая методика кадастровой оценки лесных земель как для субъектов федерации из одного федерального округа, так и для Российской Федерации в целом. Это ведет к большому разбросу цен даже для соседних регионов и препятствует адекватному сравнению земель лесного фонда по их качеству и экономической привлекательности;
- 2) оценку лесных земель проводят по укрупненным систематическим единицам – районным лесничествам. Единый УПКС на такой большой территории усредняет стоимость и не дает возможности дифференцировать лесные земли по качеству и продуктивности;
- 3) при оценке лесных земель не учитываются альтернативные виды использования лесных земель, такие как заготовка недревесной и побочной продукции лесопользования;
- 4) таксационные показатели древостоя при расчетах не привносят к возрасту спелости, так как кадастровая оценка должна проводиться для спелых древостоев, а не на момент таксации.

Целью исследований является разработка методики кадастровой оценки лесных земель, которая бы учитывала индивидуальные особенности таксационных выделов, текущий прирост древесины, основывалась на учете всех доступных видов лесных ресурсов. Важной особенностью является возможность ее применения для всех субъектов федерации с изменениями для отражения региональной специфики (различные виды недревесной продукции леса и породы деревьев).

Предлагаемая методика опирается на классические труды западных экономистов, в частности М. Фаустманна, еще в 1850 г. заложившего основу всей современной экономической оценки лесов [4, 8–10]. Отечественные методики кадастровой оценки земель лесного фонда также связаны с его идеями [11], однако некоторые вопросы в них не были проработаны достаточно подробно. Основные отличия разрабатываемой методики от предшествующих: учет текущего прироста древесины, который позволяет определять запас древесины на момент спелости древостоя, а не на момент его таксации; подробный учет недревесной продукции леса, выбор наиболее эффективного вида использования участка – для заготовки древесины или для заготовки недревесной продукции. В качестве исход-

ных данных используются таксационные показатели насаждений, которые каждые 10 лет обновляются при лесоустройстве для каждого участка лесничества.

## Методы

Информация о стоимости тех или иных ресурсов леса была получена из данных Росстата [12] или открытых источников в Интернете, а сведения об урожайности недревесных лесных ресурсов и изменении таксационных показателей древостоя во времени – из справочной, научно-технической и нормативной литературы по данной тематике [13–15].

Удельный показатель кадастровой стоимости рассчитывают как сумму дисконтированных денежных потоков (ДДП) от использования участков лесных земель для заготовки древесины и различных видов недревесной продукции леса. Прибыль для каждого из видов использования рассчитывают и дисконтируют по отдельности, после чего суммируют. В случае заготовки лесной продукции, которая не учтена в методике, или, наоборот, отсутствия одного из видов ресурсов, итоговую формулу изменяют путем добавления или удаления слагаемых. По предлагаемой методике итоговое значение УПКС состоит из следующих составляющих (1):

$$\text{УПКС} = V_{\text{др}} + V_{\text{гр}} + V_{\text{яг}} + V_{\text{бс}} + V_{\text{жив}} + V_{\text{хв}} + V_{\text{кор}}, \quad (1)$$

где УПКС – удельный показатель кадастровой стоимости, р/га;  $V_{\text{др}}$  – ДДП от заготовки древесины, р/га;  $V_{\text{гр}}$  – ДДП от заготовки грибов, р/га;  $V_{\text{яг}}$  – ДДП от заготовки ягод, р/га;  $V_{\text{бс}}$  – ДДП от заготовки березового сока, р/га;  $V_{\text{жив}}$  – ДДП от заготовки живицы, р/га;  $V_{\text{хв}}$  – ДДП от заготовки хвой, р/га;  $V_{\text{кор}}$  – ДДП от заготовки коры и бересты, р/га.

Выбор ресурсов обусловлен следующими причинами:

- распространенность на Северо-Западе таежной зоны России, как объекта апробации методики;
- распространённость на открытом рынке, что дает возможность получить информацию о ценах на эти ресурсы;
- существование методов аналитического определения запаса данных ресурсов.

ДДП от использования древесины рассчитывали по следующей схеме (рис. 1). Расчет проводили по формуле (2). Информация о расходах лесозаготовителей является коммерческой и не разглашается, поэтому авторы использовали данные о рентабельности продажи лесных ресурсов, полученные из открытых источников [16].

$$V_{\text{др}} = \frac{P_{\text{л}} Q_{\text{л}} R}{(1+d)^t} + \frac{P_{\text{л}} Q_{\text{л}} R}{(1+d)^{t+T}} + \frac{P_{\text{х}} Q_{\text{х}} R}{(1+d)^t} + \frac{P_{\text{х}} Q_{\text{х}} R}{(1+d)^{t+T}}, \quad (2)$$

где  $P_l$  – цена кругляка мелколиственной древесины, р/м<sup>3</sup>;  $P_x$  – цена кругляка хвойной древесины, р/м<sup>3</sup> [6];  $Q_l$  – запас лиственной древесины на выделе к моменту спелости преобладающей породы, м<sup>3</sup>/га;  $Q_x$  – запас хвойной древесины на выделе к моменту спелости преобладающей породы, м<sup>3</sup>/га (используются таксационные показатели для лиственной и хвойной древесины);  $R$  – рентабельность лесозаготовок (используется статистическая или рыночная информация);  $d$  – коэффициент дисконтирования (принят равным 0,02 по результатам анализа научно-технической литературы [4, 15, 17] по данной тематике);  $t$  – время до главной рубки преобладающей на выделе породы, лет (разность между возрастом древостоя на настоящий момент времени и возрастом спелости преобладающей породы);  $T$  – продолжительность оборота рубки преобладающей на выделе породы, лет (принята равной 60 годам для мелколиственных и 80 годам для хвойных пород деревьев).



Рис. 1. Механизм расчета ДДП от заготовки древесины

Fig. 1. Algorithm of calculation of timber harvest discounted cash flow (DCF)

Запас хвойной и лиственной древесины к моменту главной рубки определяли по формулам (3) и (4) [18], выведенным на основе данных о текущем приросте древесины для северо-запада России [14, 15].

$$Q_l = Q_l^{\text{факт}} \cdot 4786,8 I_l^{-2,076}, \quad (3)$$

где  $Q_l^{\text{факт}}$  – запас лиственной древесины на выделе на момент оценки, м<sup>3</sup>/га (используются таксационные показатели);  $I_l$  – возраст лиственного древостоя на момент оценки, лет (используются таксационные показатели).

$$Q_x = Q_x^{\text{факт}} \cdot 53923 I_x^{-2,491}, \quad (4)$$

где  $Q_x^{\text{факт}}$  – запас хвойной древесины на выделе на момент оценки, м<sup>3</sup>/га;  $I_x$  – возраст хвойного древостоя на момент оценки, лет.

ДДП от использования пищевых ресурсов (заготовка грибов и ягод, березового сока) был определен по схеме (рис. 2). Расчет проведен по формуле (5) [19].

$$V_{\text{пищ}} = \frac{\left( \sum_n^1 Q_n^{\text{пищ}} P_n^{\text{пищ}} \right) \frac{R_{\text{пищ}}}{1 + R_{\text{пищ}}} T_{\text{пищ}}}{(1 + d)^t} + \frac{\left( \sum_n^1 Q_n^{\text{пищ}} P_n^{\text{пищ}} \right) \frac{R_{\text{пищ}}}{1 + R_{\text{пищ}}} T_{\text{пищ}}}{(1 + d)^{(t+T)}}, \quad (5)$$

где  $V_{\text{пищ}}$  – ДДП от заготовки пищевых ресурсов, р/га ( $V_{\text{гр}}$  – грибы,  $V_{\text{яг}}$  – ягоды,  $V_{\text{бс}}$  – березовый сок);  $n$  – число видов пищевого ресурса, заготавливаемого на выделе (биологических видов грибов, ягод);  $Q_n^{\text{пищ}}$  – средний годовой объем заготовки пищевого ресурса на выделе, кг/га (данные берутся из лесотаксационных справочников в зависимости от типа лесорастительных условий);  $P_n^{\text{пищ}}$  – стоимость единицы пищевого ресурса, р/кг;  $R_{\text{пищ}}$  – рентабельность заготовки пищевых ресурсов;  $T_{\text{пищ}}$  – продолжительность периода заготовки пищевого ресурса за время одного оборота рубки, лет (данные берутся из инструкций по заготовке оцениваемого вида пищевого ресурса) [14].

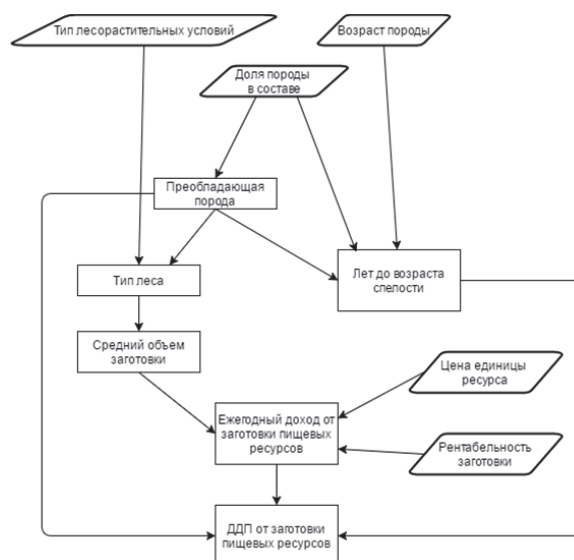


Рис. 2. Механизм расчета ДДП от заготовки пищевых ресурсов

Fig. 2. Algorithm of calculation of food resources harvest DCF

ДДП от заготовки побочной продукции лесопользования рассчитан по схемам (рис. 3–5) и формулам (6)–(8) в зависимости от типов природных ресурсов [13].

$$V_{\text{жив}} = \frac{ug(1 - 0,011T_{\text{жив}})W_k P_{\text{жив}} \frac{R_{\text{жив}}}{1 + R_{\text{жив}}}}{(1 + d)^t} + \frac{ug(1 - 0,011T_{\text{жив}})W_k P_{\text{жив}} \frac{R_{\text{жив}}}{1 + R_{\text{жив}}}}{(1 + d)^{(t+T)}}, \quad (6)$$

где  $u$  – число карр на 1 м<sup>2</sup> сечения соснового древостоя, шт.;  $g$  – сумма площадей сечения соснового древостоя на высоте 1,3 м (абсолютная полно-

та), м<sup>2</sup>;  $T_{жив}$  – продолжительность периода подсочки, лет (согласно данным из инструкций по подсочке [13]);  $W_k$  – среднесезонный выход живицы с одной карры, кг (принято равным 0,58 [13]);  $P_{жив}$  – стоимость живицы, р/кг;  $R_{жив}$  – рентабельность заготовки живицы.

Число карр (участок на поверхности ствола, где проводится подсочка) зависит от среднего диаметра древостоя. Нами использовано уравнение связи для I–II категорий подсочки как наиболее распространенных для лесорастительных условий, в которых проводится оценка:

$$u = -0,0591D^2 + 3,3366D - 27,991, \quad (7)$$

где  $D$  – средний диаметр соснового древостоя на выделе, см (по данным таксационных описаний).

$$g = (11,644 \ln(h_{сос}) + 1,7994) y_{сос}, \quad (8)$$

где  $h_{сос}$  – средняя высота соснового древостоя на выделе, м (по данным таксационных описаний);  $y_{сос}$  – доля соснового древостоя, доли единицы (по данным таксационных описаний).

Для расчета ДДП от заготовки коры и бересты была использована формула (9) и схема (рис. 4):

$$V_{кор} = \frac{0,013(Q_{л} + Q_{х})P_{кор} \frac{R}{1+R}}{(1+d)^t} + \frac{0,013(Q_{л} + Q_{х})P_{кор} \frac{R}{1+R}}{(1+d)^{(t+T)}}, \quad (9)$$

где  $P_{кор}$  – стоимость коры, р/м<sup>3</sup>; 0,013 – доля, которую кора занимает от общего запаса древесины [13].

Для расчета ДДП от заготовки хвои была использована формула (10). Алгоритм расчета представлен на рис. 5

$$V_{хв} = \frac{(Q_{хв.сос} + Q_{хв.ел})P_{хв} \frac{R}{1+R}}{(1+d)^t} + \frac{(Q_{хв.сос} + Q_{хв.ел})P_{хв} \frac{R}{1+R}}{(1+d)^{(t+T)}}, \quad (10)$$

где  $Q_{хв.сос}$  – запас сосновой хвои, кг/га;  $Q_{хв.ел}$  – запас еловой хвои, кг/га;  $P_{хв}$  – стоимость хвои, р/кг.

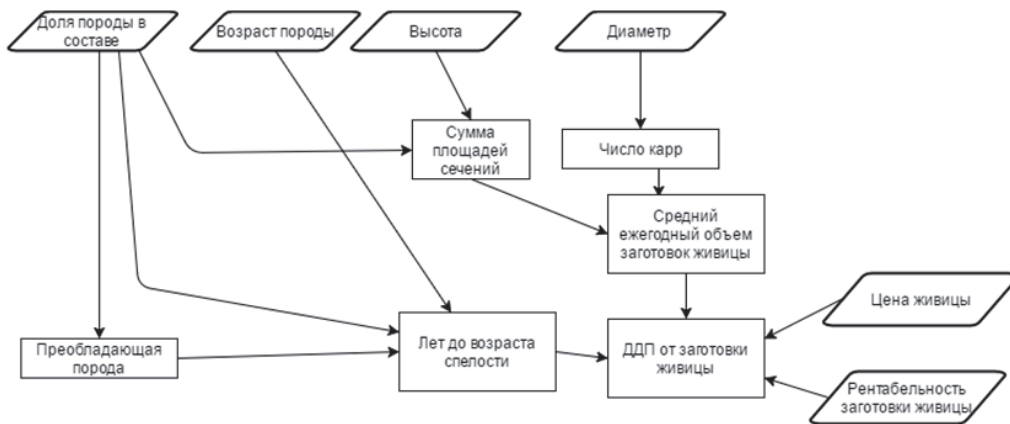


Рис. 3. Механизм расчета ДДП от заготовки живицы

Fig. 3. Algorithm of calculation of galipot harvest DCF

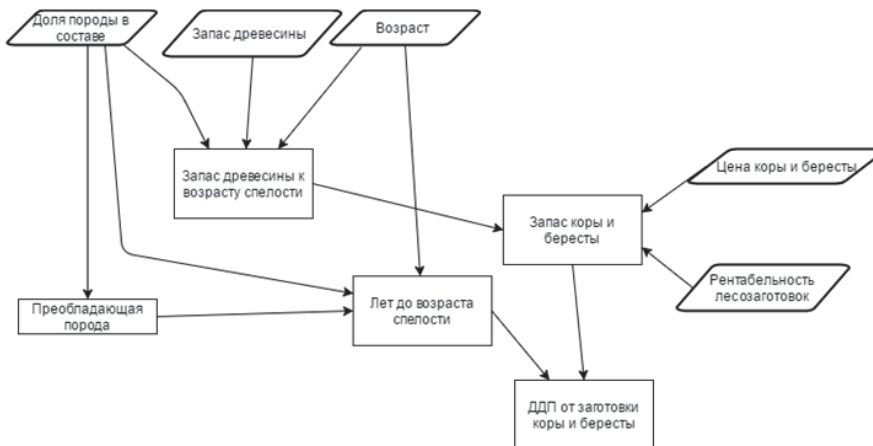


Рис. 4. Механизм расчета ДДП от заготовки коры и бересты

Fig. 4. Algorithm of calculation of bark harvest DCF



Рис. 5. Механизм расчета ДДП от заготовки хвой (древесной зелени)

Fig. 5. Algorithm of calculation of needle-foilage harvest DCF

Запас хвой определен по формулам (11) и (12). Удельный запас древесины рассчитывается по формуле для хвойной древесины, приведенной выше. Коэффициент 0,7 введен для учета потерь хвой при заготовке.

$$Q_{хв.сос} = Q_{сос} \cdot 123h_{сос}^{-0,343} \cdot 0,7; \quad (11)$$

$$Q_{хв.ел} = Q_{ел} \cdot 151,27h_{ел}^{-0,238} \cdot 0,7, \quad (12)$$

где  $Q_{сос}$  – удельный запас древесины сосны к моменту главной рубки, м<sup>3</sup>/га;  $Q_{ел}$  – удельный запас древесины ели к моменту главной рубки, м<sup>3</sup>/га;  $h_{сос}$  – средняя высота соснового древостоя, м;  $h_{ел}$  – средняя высота елового древостоя, м.

При помощи геоинформационной системы MapInfo было создано графическое представление распределения УПКС по оцениваемой территории. Из материалов лесоустроительных планшетов получены координаты конкретных выделов, которым присвоены соответствующие УПКС, после чего построена тематическая карта (рис. 8). Для интерполяции полученных значений и создания градиента авторы применяли метод обратных взвешенных расстояний (IDW – Inverse Distance Weighting). Размер ячейки выбран равным 11 м, степень функции зависимости весов точек от расстояния  $p=1$ , радиус поиска – 500 м. Так как размеры выделов относительно всего рассматриваемого объекта относительно невелики, то авторы использовали данный метод, подразумевающий точечные значения. Соответственно, в центре каждого выдела создавали ячейку с известной стоимостью, а значения прочих ячеек интерполировались.

### Результаты

Апробацию разработанной методики проводили с использованием таксационных и геоинформационных данных Линдуловского участкового лесничества Рошинского районного лесничества Ленинградской области. Рассчитывали величину

УПКС для 250 выделов. Цены лесных ресурсов, использованные при определении кадастровой стоимости, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Цены лесных ресурсов, использованные при определении кадастровой стоимости

Table 1. Forest resource prices used for calculating cadastral value

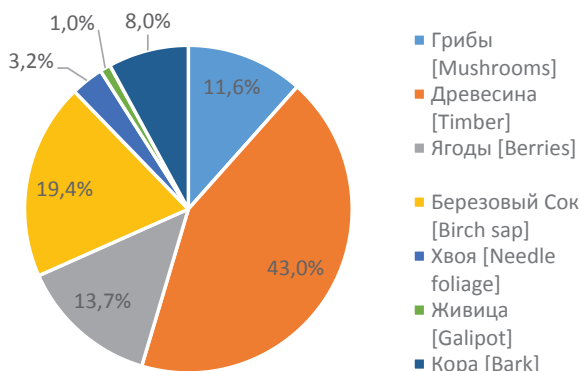
Вид/Type	Цена, р/ед/Price, rub/unit
Древесина/Timber	
Хвойная/Pine	1475
Лиственная/Broadleaf	1272
Грибы/Mushrooms	
Белые/Serp	300
Грузди/Milk mushroom	310
Рыжики/Saffron milk-cap	190
Подосиновики/Aspen mushroom	200
Подберезовики/Birch bolete	320
Маслята/Slippery jack	500
Волнушки/Wooly milk-cap	190
Моховики/Suede bolete	120
Козляки/Bovinus mushroom	100
Сыроежки/Russule	120
Ягоды/Berry	
Брусника/Clusterberry	150
Голубика/Swamp blueberry	170
Рябина/Rowan	65
Калина/Arrowwood	85
Черника/Blueberry	195
Прочая недревесная продукция/Other non-wood resources	
Березовый сок/Birch sap	20
Живица сосновая/Galipot	10
Кора/Bark	2000
Хвоя/Needle foliage	5

Итоговые значения находятся в пределах от 11780 до 91880 р/га, среднее значение – 57480 р/га, медианное – 61750 р/га. Распределение вклада в значение УПКС рассчитанных ДДП от использования лесных ресурсов представлено на диаграмме (рис. 6), значения приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Прибыль от заготовки различных видов лесных ресурсов и цены, использованные при расчетах

**Table 2.** Profit from harvest of different forest resources and prices used at calculations

Вид лесного ресурса Type of resource	Удельная прибыль, р/га Per unit profit, rub/ha
Древесина/Timber	21870
Ягоды/Berry	13680
Березовый сок/Birch sap	9870
Грибы/Mushrooms	5880
Кора и береста/Bark	4040
Хвоя/Needle foliage	1650
Живица/Galipot	520
Итого/Total	57510



**Рис. 6.** Вклад ДДП различных видов лесных ресурсов в значения УПКС

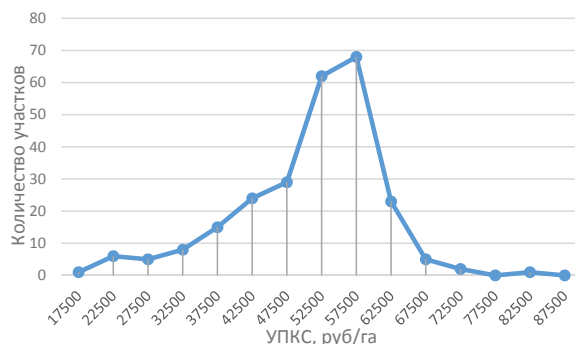
**Fig. 6.** Proportion of different forest resources DCF in the meaning of per unit cadastral value index

Как видно из результатов исследования, заготовка древесины, хоть и одна из самых доходных статей от использования участков лесных земель, но не является преобладающей, по совокупности вклада в УПКС уступая недревесным лесным ресурсам. Конечно, рынок еще не может в полной мере обеспечить реализацию данной продукции, поэтому фактическая рента от использования недревесной продукции будет ниже, в связи с тем, что при массовой заготовке данных ресурсов их рыночная цена снизится. Однако даже в современном состоянии заготовки недревесная продукция леса оказывает существенный вклад в структуру кадастровой стоимости лесных земель. Это еще раз подчеркивает важность ее учета при разработке методик кадастровой оценки.

Для оценки степени дифференциации результатов и получения представления об их достоверности был построен график, показывающий частоту появления тех или иных значений удельного показателя кадастровой стоимости. Как видно из рис. 7, распределение значений УПКС стремится к нормальному, однако таковым не является из-за особенностей выборки – продуктивность оцененных выделов была выше среднего значения.

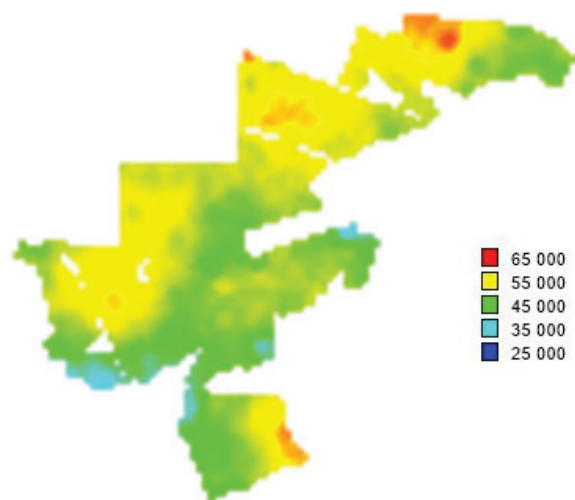
Распределение лесных участков по УПКС (рис. 7) показывает, каким неравномерным является разброс кадастровой стоимости в рамках небольшой территории. На территории всего лесни-

чества дифференциация еще сильнее. Это подчеркивает важность повыделного подхода к кадастровой оценке лесных земель и недопустимость усредненных значений даже в рамках участковых лесничеств.



**Рис. 7.** Распределение значений УПКС по частоте

**Fig. 7.** Frequency distribution of per unit cadastral value indexes



**Рис. 8.** Дифференциация земель лесничества по кадастровой стоимости. Цветами в легенде обозначены средние значения УПКС

**Fig. 8.** Differentiation of forestland by cadastral value. Colors are for average meanings of per unit cadastral value indexes

Как видно из рис. 8, основной массив лесных земель, покрытых древесно-кустарниковой растительностью, имеет УПКС, равный 45000–55000 р/га. На севере и юге объекта находится небольшое число выделов с высоким (65000 р/га и более) значением УПКС. Выдела с низким значением УПКС (менее 35000 р/га) расположены в основном на юго-западном краю объекта исследований.

Стоит отметить, что в 2010 г. руководством Ленинградской области был установлен единый УПКС для всех лесных земель региона, равный 7180 р/га [20]. Поскольку данный УПКС применяется и для лесных, и для нелесных земель, вне зависимости от породного и возрастного состава древостоя на выделе, то его применение при управлении землями лесного фонда невозможно.

При должной адаптации к условиям, в которых будет проводиться оценка, данная методика может стать универсальным способом кадастровой оценки лесных земель в составе лесного фонда. При кадастровой оценке нами не учитывались рекреационный и природоохранный потенциал лесных земель, поскольку в настоящее время мы не имеем реальной возможности оценивать их вклад в кадастровую стоимость – существующие подходы опираются на экспертную оценку, которая является субъективной, а один и тот же набор экспертов вряд ли будет в состоянии оценивать участки лесных земель на территории Российской Федерации. Предложенный метод следует развивать по нескольким направлениям: добавить в алгоритм расчетов все лесные блага, оценку которых возможно проводить

(например, охотничьи ресурсы); провести апробацию на лесных землях других регионов России, учитывая их особенности; разработать метод определения размера платежей за пользование лесными ресурсами на основе полученных значений УПКС.

#### Выводы

Предлагаемая методика может быть использована при государственной кадастровой оценке земель лесного фонда в различных субъектах федерации. Расчеты являются автоматизированными и требуют только ввода исходных данных. Это позволяет с высокой производительностью определять кадастровую стоимость для большого количества лесных участков, обеспечивая дифференциацию результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесной кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ (ред. 03.07.2016г.) // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/) (дата обращения 26.12.2016).
2. Forest Resources Assessment 2015. Terms and Definitions. URL: <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf> (дата обращения: 26.12.2016).
3. Gómez A. Natural resources and environmental economic valuation // Revista de Tecnología – Journal of Technology. – 2008. – V. 7. – № 2. – P. 32–40.
4. Amacher G.S., Ollikainen M., Koskela E. Economics of Forest Resources. – Massachusetts: the MIT Press, 2009. – 386 p.
5. Stenger A., Harou P., Navrud S. Valuing environmental goods and services derived from the forests // Journal of Forest Economics. – 2009. – № 15. – P. 1–14.
6. Об оценочной деятельности в Российской Федерации: Федеральный закон от 29.07.1998 г. № 135-ФЗ (ред. 03.07.2016) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1998. – № 31. – Ст. 3813.
7. Ковязин В.Ф., Романчиков А.Ю. Проблема определения кадастровой стоимости земель лесного фонда // Записки Горного института. – 2015 – Т. 216. – С. 50–56.
8. Pearce D., Moran D. The economic value of biodiversity. – London: Earthscan Publications, 1994. – 106 p.
9. Strang W. On the Optimal Forest Harvesting Decision // Economic Inquiry. – 1983. – № 21. – P. 576–583.
10. Chang S. An Economic Analysis of Forest Taxation's Impact on Optimal Rotation Age // Land Economics. – 1982. – № 58. – P. 310–323.
11. Об утверждении методики государственной кадастровой оценки земель лесного фонда Российской Федерации: приказ Росземкадастра от 17.10.2002 г. № П/336 // Справочно-правовая система «Консультант Плюс». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_40052/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40052/) (дата обращения 26.12.2016).
12. Федеральная служба государственной статистики – Интерактивная витрина. URL: <http://cbsd.gks.ru/> (дата обращения 23.12.2016).
13. Грязькин А.В., Кондратенко Н.Н., Пона Д.С. Недревесная продукция леса. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2006. – 338 с.
14. Лесотаксационный справочник по Северо-Западу СССР / А.Г. Мошкалев, Г.М. Давидов, Л.Н. Яновский, В.С. Моисеев, Д.П. Столяров, Ю.И. Бурневский. – Л.: ЛТА, 1984. – 320 с.
15. Лопаткина Л.Ф. Экономическая оценка многоцелевого использования леса в агропромышленном комплексе: На примере Новгородской области: дис... канд. эконом. наук. – Великий Новгород, 2000. – 167 с.
16. Уровень рентабельности (убыточности) работ, услуг в области лесного хозяйства и лесозаготовок, всего по Российской Федерации в процентах на 1 января исследуемого года. URL: <http://www.umocpartner.ru/assets/files/Analitika/Uroven%20rentabelnosti%20lesnogo%20hozyaistva%20i%20lesozagotovok%20za%202005-2010%20god.pdf> (дата обращения 23.12.2016).
17. Manley B. Discount rates used for forest valuation – Results of 2009 survey // New Zealand Journal of forestry. – 2010. – № 54 (4). – P. 19–23.
18. Ковязин В.Ф., Романчиков А.Ю. Учет текущего прироста запаса древесины при кадастровой оценке лесных земель // Научное обозрение. – 2015. – № 12. – С. 345–352.
19. Kovyazin V., Romanchikov A., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012039. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012039> (дата обращения 23.12.2016).
20. Об утверждении результатов государственной кадастровой оценки земель лесного фонда на территории Ленинградской области: постановление правительства Ленинградской области № 76 от 30.04.2010 г. // Справочно-правовая система «Техэксперт». URL: <http://docs.cntd.ru/document/891828247> (дата обращения 26.12.2016).

Поступила 03.02.2017 г.

#### Информация об авторах

**Ковязин В.Ф.**, доктор биологических наук, профессор кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

**Романчиков А.Ю.**, аспирант кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 630\*6

## METHOD OF FORESTLAND CADASTRAL EVALUATION WITH RESULTS PRESENTATION AS GEOLOGIC INFORMATIONAL

Vasily F. Kovyazin<sup>1</sup>,  
vfkedr@mail.ru

Aleksey Yu. Romanchikov<sup>1</sup>,  
romanchicov@inbox.ru

<sup>1</sup> Saint-Petersburg mining university,  
2, 21<sup>st</sup> line, Vasilyevsky island, Saint-Petersburg, 199106, Russia.

*Relevance of the study is determined by the absence of the government approved method of state cadastral evaluation of forestlands and major divergence between methods of private valuation agencies.*

**The main aim** of the study is to develop the method of cadastral evaluation of forestlands which can consider individual aspects of minimal inventory items – stratum. It should be acceptable for every region of Russia and should be based on considering all usable types of forest resources which can be harvested in region.

**The methods used in the study.** Cash flow discounting method is used for cadastral value calculation. Regression analysis is used to determine the dependence between inventory indexes and forest resources fertility. Geographic informational modeling using MapInfo is carried out for visualization of results and their verification.

**The result** of the work is the automate method which allows determining forestland cadastral value by stratum using forest inventory data. The result of the method approbation is per unit cadastral value indexes which correspond to normal frequency distribution. Also ground location of stratum with the determined cadastral value corresponds to stand structure and timber volume per hectare. The method is approbated on the forest inventory data of one of Leningrad region forest districts considering regional aspects.

### Key words:

State cadastral evaluation, forestlands, Faustmann formula, per unit cadastral value index, geographic informational systems.

### REFERENCES

1. *Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Forest code of the Russian Federation]. Federal law 12 April 2006 no. 200FZ (ed. 3 July 2016). ConsultantPlus legal reference system. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/) (accessed 26 December 2016).
2. *Forest Resources Assessment 2015. Terms and Definitions*. Available at: <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf> (accessed 26 December 2016).
3. Gómez A. Natural resources and environmental economic valuation. *Revista de Tecnología – Journal of Technology*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 32–40.
4. Amacher G.S., Ollikainen M., Koskela E. *Economics of Forest Resources*. Massachusetts, the MIT Press, 2009. 386 p.
5. Stenger A., Harou P., Navrud S. Valuing environmental goods and services derived from the forests. *Journal of Forest Economics*, 2009, no. 15, pp. 1–14.
6. *Ob otsenochnoy deyatel'nosti v Rossiyskoy Federatsii* [On evaluation activity in the Russian Federation]. Federal law 29 July 1998 no. 135FZ (ed. 3 July 2016).
7. Kovyazin V.F., Issue of calculating forestland cadastral value. *Journal of Mining Institute*, 2015, vol. 216, pp. 50–56. In Rus.
8. Pearce D., Moran D. *The economic value of biodiversity*. London, Earthscan Publications, 1994. 106 p.
9. Strang W. On the Optimal Forest Harvesting Decision. *Economic Inquiry*, 1983, no. 21, p. 576–583.
10. Chang S. An Economic Analysis of Forest Taxation's Impact on Optimal Rotation Age. *Land Economics*, 1982, no. 58, pp. 310–323.
11. *Ob utverzhdenii metodiki gosudarstvennoy kadastrvoy otsenki zemel lesnogo fonda Rossiyskoy Federatsii* [On approval of state forest fund cadastral evaluation method in the Russian Federation]. Decree of Russian cadastral agency 17 October 2002, no. P/336. ConsultantPlus legal reference system. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_40052/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40052/) (accessed 26 December 2016).
12. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki – Interaktivnaya vitrina* [Federal service of state statistics – Interactive showcase]. Available at: <http://cbsd.gks.ru/> (accessed 23 December 2016).
13. Gryazkin A.V., Kondratenko N.N., Pona D.S. *Nedrevesnaya produktsiya lesa* [Non-wood production of forests]. Saint-Petersburg, Polytechnic University Publ., 2006. 338 p.
14. Moshkalev A.G., Davidov G.M., Yanovskiy L.N. *Lesotaksatsionny spravochnik po Severo-Zapadu SSSR* [Forest inventory reference book for the North-West of USSR]. Leningrad, Forest technical academy Publ., 1984. 320 p.
15. Lopatkina L.F. *Ekonomicheskaya otsenka mnogotselevogo ispolzovaniya lesa v agropromyshlennom komplekse: Na primere Novgorodskoy oblasti*. Dis. Kand. nauk [Economic evaluation of multi-purpose use of forests in agricultural complex: case study of Novgorod region. Cand. Diss.]. Veliky Novgorod, 2000. 167 p.
16. *Uroven rentabelnosti (ubytochnosti) rabot, uslug v oblasti lesnogo khozyaystva i lesozagotovok, vsego po Rossiyskoy Federatsii v protsentakh na 1 yanvarya issleduemogo goda* [Profitability level of services in the sphere of forestry and harvesting in Russian Federation on 1<sup>st</sup> February of the investigated year]. Available at: <http://www.umocpartner.ru/assets/files/Analitika/Uroven%20rentabelnosti%20lesnogo%20hozyaystva%20i%20lesozagotovok%20za%202005–2010%20god.pdf> (accessed 23 December 2016).
17. Manley B. Discount rates used for forest valuation – Results of 2009 survey. *New Zealand Journal of forestry*, 2010, no. 54 (4), pp. 19–23.
18. Kovyazin V.F., Romanchikov A.Yu. Considering timber volume annual increment at cadastral evaluation of forestlands. *Science Review*, 2015, vol. 12, pp. 345–352. In Rus.
19. Kovyazin V., Romanchikov A., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastral appraisal estimated with regards to wood and food resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. DOI: 10.1088/1755–1315/27/1/012039. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1755–1315/27/1/012039> (accessed 23 December 2016).

20. *Ob utverzhdenii rezultatov gosudarstvennoy kadastrvoy otsenki zemel lesnogo fonda na territorii Leningradskoy oblasti* [On approval of state forestland cadastral evaluation results in the Leningrad region]. Decree of the Leningrad region government.

30 April 2010 no. 76. Techexpert legal reference system Available at: <http://docs.cntd.ru/document/891828247> (accessed 26 December 2016).

*Received: 3 February 2017.*

**Information about the authors**

*Vassily F. Kovyazin*, Dr. Sc., professor, Saint-Petersburg mining university.

*Aleksey Yu. Romanchikov*, postgraduate, Saint-Petersburg mining university.



**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 27.02.2017. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,14. Уч.-изд. л. 11,89.  
Заказ 63-17. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ